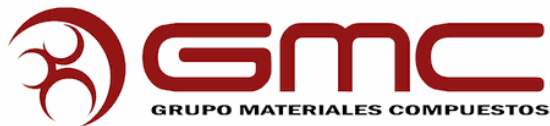


# MORTEROS DE PEGA CON MATERIALES ALTERNATIVOS CEMENTICIOS



BRAYAN LOPEZ VALENCIA  
KAREN ECHEVERRY BUSTOS



UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
ESCUELA DE INGENIERIA DE MATERIALES  
SANTIAGO DE CALI  
2017

# **MORTEROS DE PEGA CON MATERIALES ALTERNATIVOS CEMENTICIOS**

KAREN ECHEVERRY BUSTOS  
BRAYAN LOPEZ VALENCIA

TRABAJO DE GRADO PARA OPTAR AL TITULO DE:  
INGENIERO(A) DE MATERIALES

DIRECTOR:  
Ing. Rafael Robayo  
CO-DIRECTORA:  
Ruby M. de Gutiérrez. PhD

UNIVERSIDAD DEL VALLE  
FACULTAD DE INGENIERIAS  
PROGRAMA DE INGENIERIA DE MATERIALES  
SANTIAGO DE CALI  
2017

Nota de aceptación

---

---

---

Director

---

Evaluator

---

Evaluator

---

*A Dios, mis padres, hermanas y todas las personas que de una u otra manera hacen de mí un mejor ser.*

***Karen Echeverry Bustos***

*A Dios, a mis padres, hermanos y sobrinos, a cada una las personas que me han ayudado a construir el camino, en este viaje por el universo.*

***Brayan López valencia***

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo significa para nosotros un gran logro puesto que es el resultado de mucho esfuerzo y dedicación en el cual no solo hemos vivido momentos especiales sino que también nos ha permitido conocernos a nosotros mismos de alguna manera ya que en algunas ocasiones hemos tenido que tomar decisiones que nos permitieron crecer como profesionales y de esa manera adquirir un mayor conocimiento en el área de los materiales.

Damos un agradecimiento especial a nuestros familiares, padres, hermanos, personas allegadas y nuestros compañeros de estudio que se han convertido para nosotros en una segunda familia, por creer y esperar de nosotros lo mejor en todo momento, por brindarnos su apoyo y compañía en las situaciones más difíciles de nuestras vidas, por aportar a nuestro crecimiento motivándonos a ser mejores personas, mejores profesionales y por tanto mejores ingenieros de materiales.

Agradecemos también al Grupo de Materiales Compuestos de la Universidad del Valle, a nuestros profesores, laboratoristas, compañeros y demás que estuvieron presentes en los días de nuestra formación académica complementando nuestro conocimiento convirtiéndonos así en los mejores profesionales.

Especial agradecimiento a la Dra. Ruby Mejía de Gutiérrez por brindarnos la oportunidad de trabajar con ella; un profundo agradecimiento a nuestro director de tesis el Ingeniero Rafael Robayo por el apoyo, orientación, tiempo y dedicación.

También agradecemos al proyecto “Construcción de prototipo de una vivienda rural utilizando materiales innovadores de baja huella de carbono “

Agradecemos especialmente a Constanza Gutiérrez y July Manquillo, al personal del laboratorio químico y de los demás laboratorios que de alguna u otra forma tuvieron influencia en la ejecución de este proyecto.

Queremos agradecer especialmente a nuestros amigos del código 2012 por su amistad y apoyo incondicional, por haber compartido con nosotros demasiados momentos de felicidad.

Finalmente queremos agradecer a todas aquellas personas que de alguna u otra manera hicieron parte de nuestra formación profesional y nos apoyaron durante este proceso.

## TABLA DE CONTENIDO

|   |    |
|---|----|
| 1. INTRODUCCIÓN.....  | 7  |
| 2. ESTADO DEL ARTE.....   | 8  |
| 2.1 Generalidades de los Geopolímeros .....   | 8  |
| 2.2 Mecanismo de Geopolimerización .....  | 8  |
| 2.3 Materias primas.....  | 10 |
| 2.3.1 Ceniza Volante .....  | 10 |
| 2.3.2 Puzolana.....   | 11 |
| 2.3.3 Escoria de alto horno.....  | 12 |
| 2.3.4 Sustancias Activadores .....  | 12 |
| 2.4 Ventajas de la utilización de los geopolímeros en comparación del cemento Portland..... | 13 |
| 2.5 Morteros de pega. ....  | 14 |
| 3. OBJETIVOS.....   | 18 |
| 3.1 Objetivo general .....  | 18 |
| 3.2 Objetivos Específicos .....   | 18 |
| 4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....  | 19 |
| 4.1 Materiales y Equipos .....  | 19 |
| 4.2 Revisión bibliográfica .....  | 21 |
| 4.3 Materiales: selección, adecuación y caracterización.....                                | 21 |
| 4.3.1 Puzolana natural.....   | 21 |
| 4.3.2 Escoria siderúrgica .....   | 23 |
| 4.3.3 Ceniza volante .....  | 24 |
| 4.3.4 Cemento portland Tipo UG .....  | 26 |
| 4.3.5 Arena Natural.....  | 28 |
| 4.3.6 Arena de Ottawa.....  | 29 |
| 4.3.7 Activadores alcalinos .....   | 29 |
| 4.4 Diseño de las mezclas .....   | 29 |
| 4.4.1 Dosificación del material cementante .....  | 30 |
| 4.4.2 Caracterización mecánica de las pastas.....   | 30 |

|         |  |    |
|---------|--|----|
| 4.5     | Evaluación preliminar a nivel de morteros.....   | 33 |
| 4.6     | Caracterización de morteros en estado plástico .....   | 33 |
| 4.7.1   | Fluidez. ....  | 33 |
| 4.7     | Caracterización en estado endurecido.....  | 34 |
| 4.8.1   | Resistencia a la compresión.....   | 34 |
| 4.8.2   | Densidad, porosidad y absorción.....   | 34 |
| 4.8.3   | Adherencia al sustrato .....   | 34 |
| 4.8.3.1 | Adherencia tipo briqueta .....   | 35 |
| 4.8     | EVALUACIÓN EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS .....  | 36 |
| 4.9.1   | Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495) ..... | 36 |
| 5.      | RESULTADOS Y ANALISIS.....   | 37 |
| 5.1     | Evaluación de la fluidez y resistencia a la compresión de los sistemas geopoliméricos.....                 | 37 |
| 5.1.1   | Morteros de PN-GBFS.....   | 37 |
| 5.1.2   | Caracterización de la mezcla optima sistema PN-GBFS.....   | 42 |
| 5.1.3   | Morteros de CV-OPC.....  | 43 |
| 5.1.4   | Caracterización de la mezcla óptima CV-OPC .....   | 46 |
| 5.2     | SISTEMAS DE REFERENCIA .....   | 47 |
| 5.2.1   | Morteros de OPC.....   | 47 |
| 5.3     | Densidad, absorción y porosidad .....  | 51 |
| 5.4     | Evaluación de la adherencia .....  | 52 |
| 5.5     | Evaluación de la parte aplicativa .....  | 54 |
| 5.5.1   | Evaluación de resistencia a la compresión de muretes .....   | 57 |
|         | CONCLUSIONES.....  | 62 |
|         | REFERENCIAS.....   | 63 |

## LISTA DE TABLAS

|   |    |
|---|----|
| Tabla 1. Clasificación de la ceniza volante de acuerdo su composición química (tomada y adaptada ASTM C618-15).....                             | 11 |
| Tabla 2. Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción, según la NSR-10 capítulo D, tabla tomada de la norma NSR-10..... | 15 |
| Tabla 3. Composición Química de la Puzolana (PN).....   | 22 |
| Tabla 4. Composición Química de la Escoria siderúrgica (GBFS).....  | 24 |
| Tabla 5. Composición Química de la ceniza (CV). ....  | 25 |
| Tabla 6. Composición química del cemento portland. ....   | 27 |
| Tabla 7. Relación de las mezclas para los morteros a desarrollar .....  | 30 |
| Tabla 8. Resistencia a compresión de las pastas geopoliméricas PN-GBFS y CV-OPC . ....  | 31 |
| Tabla 9. Determinación del porcentaje de Flujo de las diferentes mezclas de PN-GBFS. ....   | 37 |
| Tabla 10. Mesa de flujo para las diferentes mezclas del sistema PN-GBFS.....  | 38 |
| Tabla 11. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de PN-GBFS... ..  | 40 |
| Tabla 12. Resistencia a la compresión de la mezcla óptima PN-GBFS. ....   | 43 |
| Tabla 13. Determinación del porcentaje de Flujo de las diferentes mezclas de CV-OPC. ....   | 44 |
| Tabla 14. Mesa de flujo para las diferentes mezclas del sistema CV-OPC.....   | 45 |
| Tabla 15. Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de CV-OPC. ...  | 46 |
| Tabla 16. Resistencia a la compresión de la mezcla óptima CV-OPC. ....  | 47 |
| Tabla 17. Mezclas de referencia OPC.....  | 47 |
| Tabla 18. Mezclas de referencia OPC.....  | 48 |
| Tabla 19. Mezclas de referencia OPC-Ottawa .....  | 49 |
| Tabla 20. Mezclas de los sistemas óptimos con arena de Ottawa. ....   | 49 |
| Tabla 21. Clasificación de los Morteros geopoliméricos por propiedad.....   | 51 |
| Tabla 22. Datos reportados de densidad, absorción y porosidad.....  | 51 |
| Tabla 23. Patrones de falla, NTC 6050-2 .....   | 52 |
| Tabla 24. Resultados de adherencia sistema tipo briqueta. ....  | 53 |
| Tabla 25. Especificaciones Técnicas del ladrillo, Adaptada y tomada de la Ladrillera de Meléndez .....  | 57 |
| Tabla 26. Resultados obtenidos del Ensayo a la compresión de Muretes. ....  | 59 |



## LISTA DE FIGURAS

|  |    |
|--|----|
| Figura 1. Proceso de geo-polimerización. Imagen tomada y adaptada de (Duxson et al. 2007).   | 9  |
| Figura 2. Diagrama del desarrollo Experimental.  | 20 |
| Figura 3. Grafica de Distribución de tamaño de partícula de la Puzolana natural (PN).  | 21 |
| Figura 4. Imagen de SEM de la Puzolana.  | 23 |
| Figura 5. Grafica de Distribución de tamaño de partícula de la Escoria siderurgica (GBFS).   | 23 |
| Figura 6. Imagen de SEM de la Escoria.   | 24 |
| Figura 7. Gráfica de la distribución granulométrica de la Ceniza Volante.  | 25 |
| Figura 8. Imagen de SEM de la Ceniza.  | 26 |
| Figura 9. Gráfica de distribución granulométrica del cemento portland uso general.   | 27 |
| Figura 10. Imagen de SEM del cemento portland tipo UG.   | 28 |
| Figura 11. Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas; a). Muestra con agregado fino e hidróxido de sodio; b). Muestra con agregado fino e hidróxido de sodio después de 24 horas. | 28 |
| Figura 12. Cubos de pasta geopoliméricos (a) de PN-GBFS, (b) de CV-OPC después de 24h de desmoldarse   | 31 |
| Figura 13. Probetas tipo ocho, separadas a la mitad para la unión con mortero.   | 35 |
| Figura 14. Determinación de la adherencia de los morteros mediante un ensayo de tensión a probetas tipo briqueta modificadas   | 36 |
| Figura 15. Esquema del murete para la elaboración del ensayo.  | 36 |
| Figura 16. Mezcla PG5, a los tres días de curado.  | 42 |
| Figura 17. Gráfico de Resistencia a la compresión de los sistemas geopoliméricos con respecto al del OPC.  | 50 |
| Figura 18. Falla CV-OPC cohesiva dentro del adhesivo CF- A.  | 53 |
| Figura 19. Falla OPC adhesiva AF-S.  | 54 |
| Figura 20. Falla PN- GBFS adhesiva AF-S.   | 54 |
| Figura 21. Aplicación del mortero como posible mortero pañete.   | 55 |
| Figura 22. Morteros expuestos a condiciones ambientales como pañetes. (a) OPC2. (b) PN-GBFS. (c) CV-OPC.   | 56 |
| Figura 23. Muretes de Mampostería, a). Mortero de OPC2, b). Mortero de PN-GBFS, c). Mortero de CV-OPC.   | 58 |
| Figura 24. Máquina de Ensayo de Resistencia a la compresión  | 59 |
| Figura 25. Falla de los muretes de mampostería bajo carga a compresión. Murete con mortero de: a.) PN-GBFS, b.) CV-OPC y c.) OPC2.   | 61 |

## 1. INTRODUCCIÓN

Los materiales de construcción han sido un pilar en el desarrollo de la humanidad, su uso se remonta a más de 9000 años\_(Curlandia, 2011) cuando la cal obtenida por descarbonatación de la piedra caliza comenzó a ser utilizada para producir morteros hasta que fue patentado el cemento Portland (OPC), siendo actualmente el material de construcción más comercializado en el mundo (Aitcin, 2000).

La NSR-10 en el capítulo D define un Mortero de pega como una mezcla plástica de materiales cementantes, agregado fino y agua, que es utilizado para unir unidades de mampostería que forman un elemento estructural individual, en contraposición al concreto que es generalmente por sí mismo un elemento estructural. El propósito principal del mortero de mampostería es la adherencia de unidades, las unidades de mampostería, El mortero influye en las propiedades estructurales de la mampostería a la vez que reduce la permeabilidad del muro.

Los morteros de mampostería tienen dos diferencias importantes en sus propiedades según su estado: morteros en estado plástico y morteros endurecidos. Las propiedades del mortero en estado plástico determinan la facilidad de construcción de mampostería y a su vez están relacionadas con las propiedades del mortero en estado endurecido y, por lo tanto con los elementos estructurales terminados. Dentro de las propiedades plásticas del mortero que ayudan a determinar su adecuada elaboración están la manejabilidad y la retención del agua.

Muchas de las propiedades del mortero de pega no están definidas cuantitativamente en términos precisos, debido a la carencia de especificaciones, por esta y otras razones no hay normas completamente basadas en el comportamiento del material, y en la mayoría de los casos se usan normas tradicionales de morteros.

En los últimos años otros cementantes alternativos han sido desarrollados, entre estos los cementos activados alcalinamente, como por ejemplo el basado en escoria de alto horno (AAS), estos cementos han presentado propiedades similares o superiores a las del cemento portland, con una ventaja ambiental debido a que las emisiones de CO<sub>2</sub> son notablemente inferiores en comparación con los OPC, (C. Shi, 2006). Sin embargo, al igual que con la mayoría de los materiales de construcción, es necesaria mayor investigación y en particular evaluar los diversos campos de aplicación, uno de los cuales es el objetivo de este trabajo de investigación; el desarrollo de morteros de pega que cumplan las especificaciones de la norma NSR-10 capítulo D y que sean materiales de bajo impacto ambiental, contribuyendo así al desarrollo sostenible.

## 2. ESTADO DEL ARTE

### 2.1 Generalidades de los Geopolímeros

En la década de 1970, Davidovits dio a conocer los geopolímeros como una clase de polímeros inorgánicos formados por una cadena de polisialato reticulada, la cual se obtiene de la hidroxilación y policondensación de minerales tipo aluminosilicatos como la arcilla (denominados precursores) en un ambiente altamente alcalino y a temperaturas por debajo de los 160°C (Khale D., Chaudhary R., 2007). Actualmente se han incorporado a estos desarrollos otros precursores como algunos subproductos industriales, tales como las cenizas volantes.

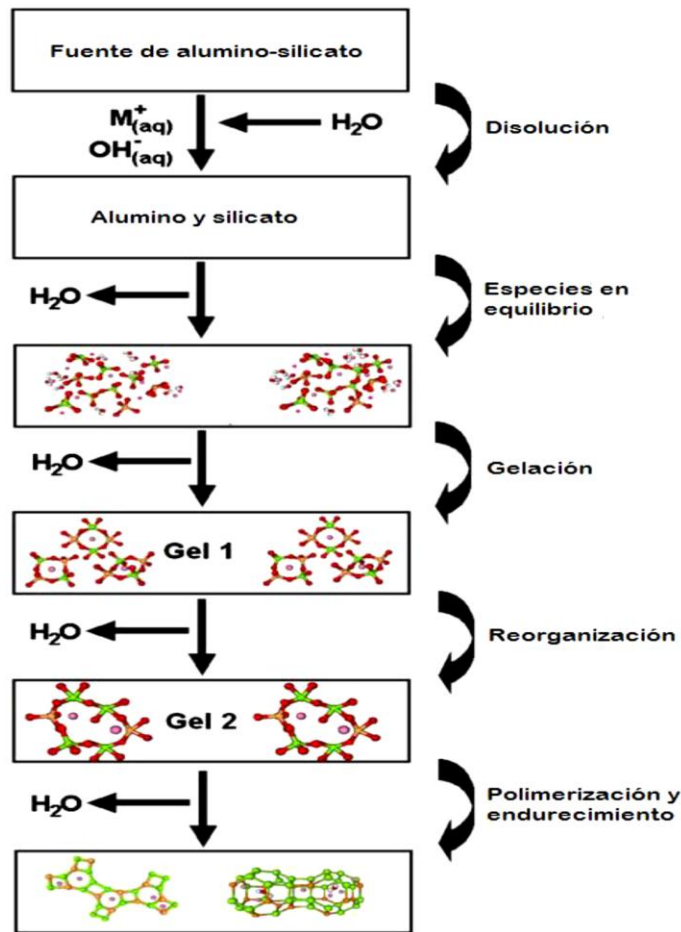
Un polisialato es una cadena o anillo de polímeros que contienen  $Si^{4+}$  y  $Al^{3+}$  con número de coordinación 4 enlazados con oxígeno. Su fórmula empírica es  $M_n [-(SiO_2)_z - AlO_2]_n + wH_2O$ , donde  $z$  puede ser 1,2 o 3,  $M$  es un catión monovalente como  $K^+$  o  $Na^+$  y  $n$  es el grado de policondensación (Komnitsas K., Zaharaki D., 2007). Como resultado de la polimerización de monómeros de aluminosilicatos en la solución alcalina se obtiene un gel con estructura tridimensional 3-D. Además de los tetraedros de Si (+4) se presentan grupos tetraédricos  $AlO_4$  debido al reemplazo en la estructura del Si ( $+4$ ) por Al ( $+3$ ), los cuales se equilibrarán con los cationes de metales alcalinos tales como  $K^+$  o  $Na^+$  (Bakharev T., 2005) y (K. Komnitsas, 2007).

### 2.2 Mecanismo de Geopolimerización

La Geopolimerización consiste en un proceso que se lleva a cabo a través de oligómeros (dímeros, trímeros) que proporcionan las estructuras necesarias para la construcción de la macromolécula tridimensional (Davidovits J., 1991).

El proceso se divide en tres etapas: a) destrucción-coagulación; b) coagulación-condensación; c) condensación-cristalización (Duxson, 2007). En la figura 1 se presenta de manera esquemática y simplificada el proceso de transformación de una fuente sólida de aluminosilicatos en un alumino-silicato alcalino sintético.

Durante el mezclado inicial de los materiales reactantes, se presenta la disolución de los sólidos de alumino-silicato en presencia de la solución MOH (M: álcali metal) "solución alcalina". Esta etapa es fundamental, cumpliendo una doble función: En primer lugar, las especies que forman polisialatos son liberadas de los materiales iniciales de forma similar a como sucede en la formación de los precursores de la zeolita (Grutzeck y Siemer, 1997) (Duxson, 2007). En segundo lugar, la disolución activa la superficie y se da paso a las reacciones de unión contribuyendo de forma significativa a la resistencia final del material.



**Figura 1.** Proceso de geo-polimerización. Imagen tomada y adaptada de (Duxson et al. 2007).

Bajo condiciones alcalinas, los aluminosilicatos adquieren una gran reactividad, y en términos generales se cree que el proceso inicia gracias a la participación de iones hidroxilo. De hecho, se ha encontrado que a mayor cantidad de iones hidroxilo se facilita más la disolución de diferentes especies de silicato y aluminato, lo que a su vez origina la polimerización adicional (Davidovits J., 1991) (Phair, Van Deventer, & Smith, 2000) (Yip C.K, 2008). Por el contrario, si las condiciones alcalinas son muy altas (superiores al 30% en moles de  $Na_2O$ ) la conectividad de los aniones de silicato puede ser reducida, resultando por lo tanto en una pobre polimerización. Algunos estudios han señalado incluso que el grado de disolución es mayor cuando se usa  $NaOH$  en lugar de  $KOH$ , debido al tamaño más pequeño del  $Na^+$  que puede estabilizar mejor los monómeros y dímeros de silicato presentes en la solución, mejorando la velocidad de disolución de minerales (Xu & J, 2000), sin embargo al respecto hay resultados controvertidos.

Posteriormente, tiene lugar la difusión o el transporte de complejos de Al y Si disueltos desde la superficie de la partícula al espacio inter-partícula; a continuación los monómeros de Silicio e hidróxidos de aluminio se encadenan como resultado de una reacción de condensación y se forma el gel como resultado de la polimerización entre la solución de silicato añadido y los complejos de Al y de Si. Finalmente se presenta el endurecimiento de la fase de gel (Xu, H; Van deventer, J, 2000).

### **2.3 Materias primas**

Para la producción de geopolímeros se pueden emplear diversas materias primas cuya composición esté basada en sílice y alúmina, preferiblemente en estado amorfo; así presentan una elevada reactividad, resultando aptos para ser empleados como fuente primaria. Algunos materiales comúnmente utilizados son la escoria granulada de alto horno, la escoria granulada de fosforo, la escoria de acero, escorias no ferrosas, la ceniza volante del carbón, el humo de sílice y minerales naturales tales como metacaolín, entre otras; estos pueden presentar diferentes grado de reactividad (Shi, C., Krivenko, P., Della, R., 2006).

Para obtener geopolímeros con mejores propiedades mecánicas se busca que las materias primas sean vítreas en la mayor medida posible y de preferencia tener un tamaño de partícula pequeño para incrementar el área superficial. Sin embargo, estos materiales por si solos no formaran el geopolímero, sino que también se requieren activadores alcalinos que inicien la reacción química (Shi, C., Krivenko, P., Della, R., 2006).

De acuerdo con la composición química de la materia prima, los cementos activados alcalinamente se pueden clasificar en dos grupos:

- Materiales sintetizados a partir de materiales ricos en calcio como la escoria de alto horno que al ser activada alcalinamente producen silicatos de calcio hidratados.
- Materiales sintetizados a partir de materia prima con bajo contenido de calcio y rico en  $SiO_2$  y  $Al_2O_3$  como el metacaolín. Cuando este material es activado alcalinamente se forma un material amorfo que desarrolla alta resistencia mecánica a edades tempranas después de un curado térmico (Khale D., Chaudhary R., 2007).

#### **2.3.1 Ceniza Volante**

La ceniza volante es un polvo de tamaño micrométrico, de forma esférica, con un tamaño de partícula que puede variar entre 1 a 150  $\mu m$  y una área superficial entre 250 y 600  $m^2 /kg$ . Estas cenizas son un subproducto de la combustión de carbón en diferentes tipos de hornos, calderas industriales o centrales termoeléctricas, la

cual en el proceso son transportados por los gases de combustión y son recolectadas por medio de filtros electrostáticos y/o cortinas de agua de los gases (Davidovits, 2011). Las cenizas volantes pueden procesarse para un mejoramiento de su calidad a través de diferentes tratamientos de clasificación, selección, molienda y/o reducción de carbón. Este material consiste básicamente en  $SiO_2$ ,  $Al_2O_3$ ,  $Fe_2O_3$ ,  $CaO$  y algunas impurezas, sus principales componentes son óxidos de sílice y alúmina, los cuales pueden variar entre 40% - 60% y 20% - 30%, respectivamente (Kosmatka & Kerkhoff B., 2004).

De acuerdo con la norma ASTM C618 (Coal Fly ash and Raw or Calcined Natural Pozzolan for use in Concrete) las cenizas volantes se pueden clasificar según la tabla 1:

**Tabla 1.** Clasificación de la ceniza volante de acuerdo su composición química (tomada y adaptada ASTM C618-15)

| Compuestos   | Clase |    |
|--|-------|----|
|  | F     | N  |
| Dióxido de silicio ( $SiO_2$ ) más óxido de aluminio ( $Al_2O_3$ ) más óxido de hierro ( $Fe_2O_3$ ), %min | 70    | 50 |
| Trióxido de azufre ( $SO_3$ ), máximo, %   | 5     | 5  |
| Contenido de humedad, máx., %  | 3     | 3  |
| Pérdida por ignición, máx., %  | 6     | 6  |

### 2.3.2 Puzolana

La norma ASTM 618 define: "las puzolanas son materiales silíceos o, que por sí solos posee poco o ningún valor cementante, pero que finamente divididos y en medio húmedo a temperatura ambiente, reaccionan químicamente con la cal, formando un compuesto con propiedades cementantes".

Las puzolanas pueden ser artificiales o naturales, algunos ejemplos son el humo de sílice, la ceniza volante, la escoria siderúrgica, el caolín, la ceniza de cascarilla de arroz, la ceniza del tallo y de la hoja de la caña de azúcar, los cuales son artificiales, mientras que otros materiales como la toba volcánica, son

considerados puzolanas naturales. Todas las propiedades de las puzolanas naturales, y en particular aquellas que las hacen especialmente aptas para su aprovechamiento en la industria de los conglomerantes hidráulicos, dependen fundamentalmente de su composición y de su textura, las cuales a su vez están íntimamente relacionadas con su origen y formación (Callejas, 1969).

### 2.3.3 Escoria de alto horno

Las escorias siderúrgicas son obtenidas en el proceso de manufactura del hierro como un residuo de la combustión del coque, cal y otros materiales. La formación de la escoria fundida se produce en la parte superior del alto horno, a temperaturas cercanas a los 1600°C. El enfriamiento de este material determina las propiedades físicas, químicas, naturaleza y sus propiedades cementicias. Un enfriamiento lento desde su estado fundido a estado sólido promueve estructuras cristalinas de silicatos de calcio, aluminio y magnesio (fundamentalmente melilita:  $(CaNa)_2(AlMgFe^{2+})(AlSi)(SiO_7)$  en una solución sólida de gelenita  $(Ca_2Al(AlSi)O_7)$  y akermanita  $(Ca_2MgSi_2O_7)$ ). Esta fase cristalina no presenta propiedades cementicias y exhibe propiedades similares al basalto (Regourd M, 1986). En cambio un enfriamiento rápido por medio de aspersion de agua a alta presión y traslado a un tambor rotatorio (peletización), genera fases vítreas de silicatos de calcio, aluminio y magnesio (Hogan, 1983) de propiedades hidráulicas latentes.

La composición química de las escorias de horno alto varía según los rangos de  $SiO_2$  28-38% y  $Al_2O_3$  8-24% y  $CaO$  30-50%. La melilita es el principal mineral que constituye las escorias. La capacidad hidráulica que tiene este tipo de escorias cuando están finamente molidas y en presencia de agua se da de una forma muy lenta y atenuada. Este comportamiento está definido por el contenido de fase vítrea, composición química, finura e historial térmico (Runzhang, Shi-Zi, & Qiong-Ying, 1983). Es por ello, que es necesario incorporar algunos activadores, como cal, cemento o soluciones alcalinas para incrementar la cinética de reacción.

### 2.3.4 Sustancias Activadores

Las sustancias activadoras son compuestos alcalinos o alcalinotérreos, entre ellos: hidróxidos ( $ROH$ ,  $R(OH)_2$ ), sales de ácido débil ( $R_2CO_3$ ,  $R_2S$ ,  $RF$ ), sales de ácido fuerte ( $Na_2SO_4$ ,  $CaSO_4 \cdot 2H_2O$ ) y sales silícicas del tipo  $R_2O_{(n)} SiO_2$  donde  $R$  es un ión alcalino del tipo  $Na$ ,  $K$  o  $Li$ . Cabe mencionar que los activadores más empleados son el  $NaOH$  o  $KOH$ , silicatos y carbonatos (Rodriguez Martinez, E.D, 2009).

Las funciones de las sustancias activadoras deben ser las siguientes:

- Acelerar la solubilización de la fuente de Aluminosilicatos.
- Favorecer la formación de hidratos estables de baja solubilidad.
- promover la formación de una estructura sólida.

Los activadores  $\text{NaOH}$ ,  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $n\text{SiO}_2$  y  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ , son los productos químicos más económicos y ampliamente disponibles, lo contrario ocurre con algunos compuestos de Potasio cuyas propiedades son muy similares a los del sodio pero su adquisición y costes dificultan su empleo (Shi, C., Krivenko, P., Della, R., 2006).

## **2.4 Ventajas de la utilización de los geopolímeros en comparación del cemento Portland**

Existe actualmente un interés especial en el desarrollo de materiales geopoliméricos, ya que su producción implica la posibilidad de un consumo reducido de energía y una menor huella de carbono en comparación con el cemento tradicional (OPC) ( Davidovits J., 1991), (Merz, 1994), (Komnitsas K., Zaharaki D., 2007) y (Bernal, 2014).

El concreto a base de cemento portland es uno de los materiales más utilizados en el sector de la construcción; este se produce convencionalmente mediante el uso de cemento portland en un rango entre el 10-15% de su masa, sin embargo la producción de OPC ha llevado a una gran preocupación ambiental por la elevada generación de  $\text{CO}_2$ , del orden de 0,7 a 1 tonelada de  $\text{CO}_2$  por tonelada de OPC producido, Van Deventer indica que la producción de geopolímeros representa una reducción de alrededor del 80% de  $\text{CO}_2$  en relación con la del cemento portland (Berry M., 2009), (S.J. van Deventer, 2007).

Las diferentes investigaciones realizadas sobre concretos de activación alcalina han demostrado que estos materiales poseen buenas propiedades mecánicas y son resistentes a diferentes medios agresivos (Sumajouw, 2006); (Wallah, 2006), y en general presentan buen desempeño a elevadas temperaturas (Kong, 2010); (Pan, 2009). La activación alcalina ha atraído gradualmente la atención del mundo científico e industrial al ser considerada como una tecnología ambientalmente sostenible e idónea para la obtención de materiales cementantes alternativos al cemento portland tradicional (OPC) (Turner, 2013) (Robayo R. M., 2016).

La obtención de sistemas geopoliméricos basados en ceniza volante (CV) fue estudiada inicialmente por Wastiels J. en 1993 (Wastiels, 1993), a través de la incorporación de soluciones activantes, constituidos con diferentes proporciones



de sílice y sodio. Bajo estas condiciones experimentales, fue posible obtener materiales con resistencia a compresión de hasta 63 MPa. De igual manera, se obtuvieron concretos con excelentes desempeños mecánicos y una elevada resistencia frente al ataque por ácidos.

La Geopolimerización de otros desechos y especialmente residuos de construcción y demolición (CDW) sigue siendo un gran desafío. Allahverdi y Kani (A. Allahverdi, 2009) investigaron la posibilidad de utilizar ladrillos y concreto en diferentes proporciones de la mezcla para producir cemento geopolimérico, sus resultados indican que los desechos de ladrillos son más adecuados que los residuos de concreto. Ahmarí et al. (S. Ahmari, 2012) Utilizando mezclas de residuos de concreto y cenizas, muestran que el aumento de molaridad del NaOH (10M) da como resultado una mayor resistencia a la compresión, alcanzando 30 MPa a la edad de 28 días. También mencionan que la adición de una solución de silicato de sodio mejora la resistencia a la compresión. Reig et al., activo residuos de ladrillo de arcilla roja con NaOH y obtuvo resistencia a la compresión de 30 MPa a la edad de 28 días, la cual se incrementó a 50 MPa mediante la optimización de la proporción agua/cementante, cementante/arena y las relaciones molares  $\text{SiO}_2 / \text{Na}_2\text{O}$  proporciones (L. Reig, 2013). Sun et al (Z. Sun, 2013) estudió la posibilidad de utilizar los residuos de cerámica para la síntesis de geopolímeros logrando una resistencia a la compresión de 71 MPa.

Por otro lado Torres et al. (Torres, 2009) reportaron el uso de residuos de vidrio y escoria de alto horno como materias primas del cemento activado con 5% de  $\text{Na}_2\text{O}$  (en relación con el contenido de escoria) usando mezclas NaOH /  $\text{Na}_2\text{CO}_3$ , la mayor resistencia mecánica (27,7 MPa) fue obtenida por el compuesto 70/30 (BFS /residuo de vidrio); los autores atribuyen la baja resistencia a la compresión de los sistemas desarrollados con alto contenido de vidrio a la baja la activación del vidrio por la solución alcalina utilizada, en comparación con una mezcla de 100% BFS.

Las ventajas mencionadas anteriormente de los cementos activados alcalinamente, han demostrado que estos cementos son potencialmente aptos para la producción de morteros de pega.

## **2.5 Morteros de pega.**

El mortero de pega es la mezcla plástica formada por la combinación de materiales cementantes, aditivos y agregado fino, que mezclados con una cantidad de agua dan lugar a una masa plástica, usado para unir las unidades de mampostería (valbuena Porras & Mena Serna, 2016).

Las principales propiedades que se deben tener en cuenta son:

- Plasticidad, facilidad con que se extiende el mortero de pega sobre una superficie sin pérdida.
- Retención del agua, capacidad del mortero de pega para evitar la pérdida de humedad, manteniendo su estado plástico.
- La trabajabilidad en mortero de pega, medida de la plasticidad de una mezcla.

Respecto al cemento de mampostería, la NSR-10 lo define como un cemento hidráulico producido para usarse en morteros de pega que genere mayor plasticidad y retención de agua que los obtenidos usando solo cemento portland.

El reglamento NSR-10 en su capítulo D, menciona que los morteros de pega utilizados en construcciones de mampostería deben cumplir la norma NTC 3329 (ASTM C270) y lo especificado en la Tabla 2.

El mortero premezclado para pega de unidades de mampostería debe cumplir con la norma NTC 3356 (ASTM C1142). Estos deben tener buena plasticidad, consistencia y ser capaces de retener el agua mínima para la hidratación del cemento y, además, garantizar su adherencia con las unidades de mampostería para desarrollar su acción cementante.

**Tabla 2.** Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción, según la NSR-10 capítulo D, tabla tomada de la norma NSR-10

| Mortero tipo     | Especificación de los morteros por propiedad <sup>(1)</sup>     |                             |                          | Especificación de los morteros por proporción |                              |   |  |      |
|------------------|---|-----------------------------|--------------------------|---|------------------------------|---|--|------|
|                  | Resistencia mínima a la Compresión $f'_{cp}$ MPa <sup>(2)</sup> | Flujo en (%) <sup>(3)</sup> | Retención Mínima de Agua | Cemento Portland                              | Cal hidratada <sup>(4)</sup> | Cemento para Mampostería <sup>(7)</sup> | Arena/Material Cementante <sup>(5)</sup> |      |
|                  |   |                             |                          |   |                              |   | Mín.                                     | Máx. |
| H                | 22.5  | 115-125                     | 75%                      | 1   | 0.25                         | no aplica                               | 2.00                                     | 2.5  |
| M                | 17.5  | 115-125                     | 75%                      | 1   | 0.25                         | no aplica                               | 2.25                                     | 3.0  |
|                  |   |                             |                          | 1   | no aplica                    | 1                                       | 2.25                                     | 2.5  |
| S                | 12.5  | 110-120                     | 75%                      | 1   | 0.25 a 0.50                  | no aplica                               | 2.50                                     | 3.5  |
|                  |   |                             |                          | 0.5   | no aplica                    | 1                                       | 2.50                                     | 3.0  |
| N <sup>(6)</sup> | 7.5   | 105-115                     | 75%                      | 1   | 0.50 a 1.25                  | no aplica                               | 3.00                                     | 4.5  |
|                  |   |                             |                          | 0   | no aplica                    | 1                                       | 3.00                                     | 4.0  |

El control de morteros en obra se debe realizar de acuerdo con la norma NTC 3546 (ASTM C780) y el ensayo de resistencia a la compresión a 28 días en cubos de 50 mm de lado, según NTC 4050 (ASTM C91).

La dosificación de los componentes de los morteros de pega debe basarse en ensayos previos de laboratorio o en experiencia de campo en obras similares y se clasifican como **H**, **M**, **S** o **N** de acuerdo con la dosificación mínima de sus componentes y con la resistencia a la compresión, tal como se aprecia en la tabla 2. La denominación de morteros tipo H, M, S o N es exclusiva para morteros de pega de mampostería y no deberá emplearse para designar otros tipos de morteros.

La resistencia a la compresión se mide a los 28 días sobre probetas tomadas en cubos de 50 mm de lado, o en cilindros de 75 mm de diámetro por 150 mm de altura. Los diferentes tipos de mortero deben cumplir con las condiciones mínimas de flujo inicial y retención de agua establecidos en la tabla 2. Para cada uno de los tipos de mortero, en la tabla 2 se indican dos alternativas de dosificación, una utilizando cemento portland y cal hidratada, y la otra utilizando cemento portland y cemento para mampostería. Puede emplearse cualquiera de las dos alternativas de dosificación, pero no se permiten dosificaciones que empleen simultáneamente cal hidratada y cemento de mampostería.

Los agregados para el mortero de pega deben cumplir la norma NTC 2240 (ASTM C144) y estar libres de materiales contaminantes o deleznales que puedan deteriorar las propiedades del mortero de pega. Así como el agua utilizada debe estar limpia y libre de cantidades perjudiciales de aceite, ácidos, alcoholes, sales, materias orgánicas u otras sustancias que puedan ser dañinas para el mortero.

En el NSR-10 título C “Concreto Estructural” subíndice 3, se especifica los Ensayos de materiales para asegurarse que los utilizados en la obra sean de la calidad especificada; ya que deben realizarse los ensayos correspondientes sobre muestras representativas de los materiales de la construcción. Cuando se trate de edificaciones que deben someterse a Supervisión Técnica de acuerdo con lo exigido por la Ley 400 de 1997 el Supervisor Técnico establecerá un programa de control de calidad de acuerdo con lo exigido en el Título I de la NSR-10.

En el título E. Casas de Uno y Dos pisos, de la NSR-10 se dan los requisitos mínimos que se deben seguir en el diseño y construcción de viviendas de uno y dos pisos, realizadas en muros de mampostería o en muros de bahareque en cementado, es decir, construcciones de uno y dos pisos que formen parte de programas de máximo 15 viviendas y menos de 3000 m<sup>2</sup> de área construida. No obstante, si se desea, para viviendas estructuradas con muros de mampostería, puede llevarse a cabo el diseño siguiendo los requisitos del Título A y el Título D del reglamento NSR-10.

Los muros de las casas de uno y dos pisos, en mampostería confinada, se clasifican en dos grandes grupos: a) Muros confinados estructurales, se consideran muros estructurales aquellos que resisten las fuerzas horizontales causadas por el sismo, o el viento, además de soportar las cargas verticales, muertas y vivas, en el caso de que constituyan soporte del entrepiso y/o cubierta. b) Muros no estructurales, son aquellos muros que cumplen la función de separar espacios dentro de la casa y que no soportan ninguna carga adicional a su peso propio.

### **3. OBJETIVOS**

#### **3.1 Objetivo general**

Obtener, caracterizar y especificar morteros de pega geopoliméricos basados en puzolanas naturales, escoria siderúrgica y cenizas volantes a partir de los resultados de síntesis de geopolímeros desarrollados en el grupo Materiales Compuestos en investigaciones previas.

#### **3.2 Objetivos Específicos**

- Diseño del mortero de pega geopolimérico a partir de los diferentes materiales cementantes alternativos seleccionados.
- Realizar un análisis comparativo de las propiedades entre los distintos morteros de geopolímeros y los morteros de cemento portland tradicionales.
- Especificar los morteros geopoliméricos desarrollados de acuerdo al capítulo D de la norma NSR-10.

## **4. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.**

Para alcanzar los objetivos de este proyecto de investigación se llevó a cabo la metodología presentada en la figura 2:

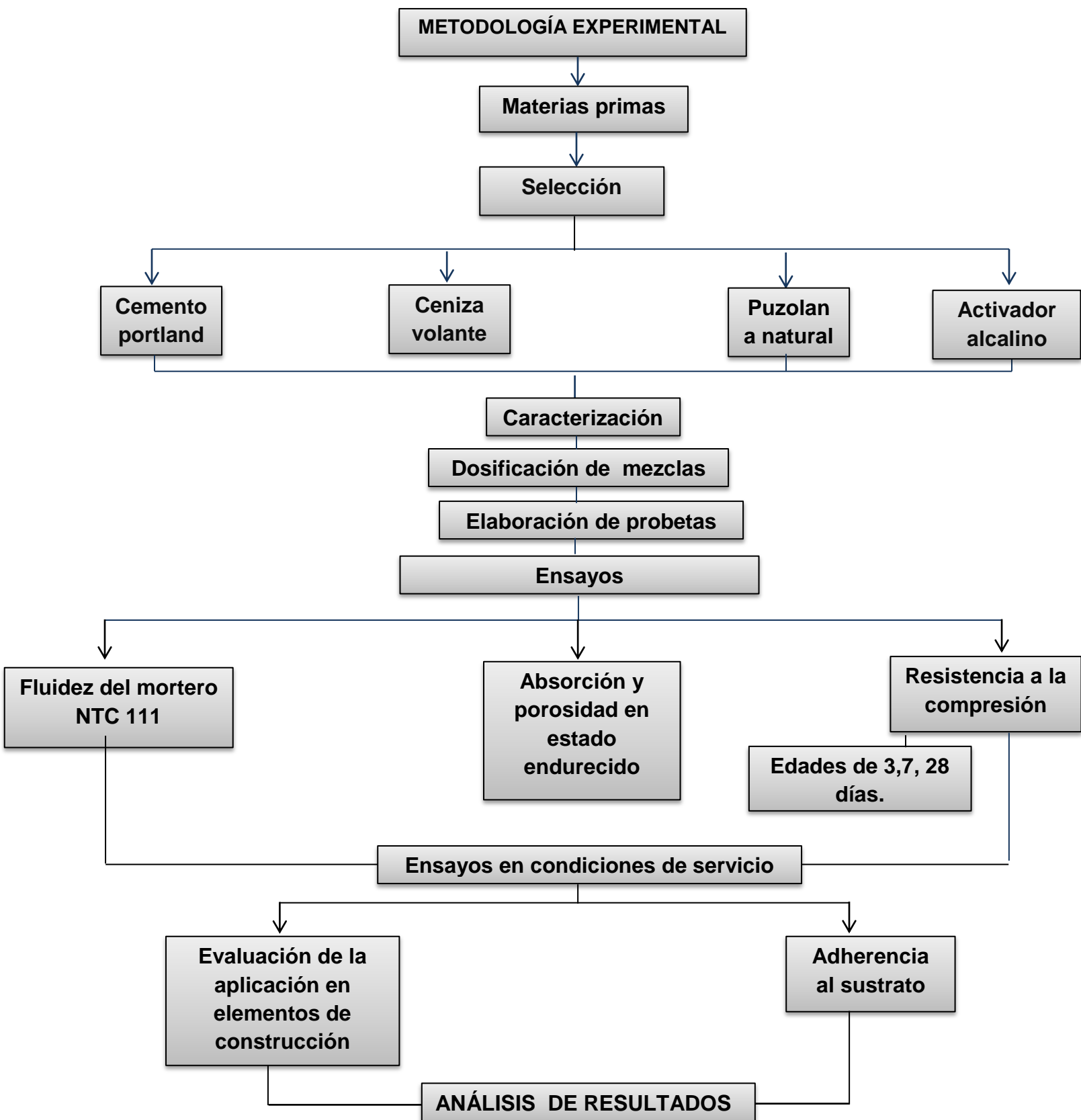
### **4.1 Materiales y Equipos**

Para la elaboración de las mezclas se utilizaron los siguientes materiales:

- Puzolana natural
- escoria de alto horno
- Ceniza Volante
  
- silicato de sodio
- Hidróxido de sodio industrial (NaOH)
- arena (NTC 2240)
- agua
- cemento portland tipo UG (marca comercial Argos).
- arena de Ottawa
- Ladrillos tipo PV (ladrillera Meléndez)

Los equipos utilizados para la elaboración de las probetas fueron:

- Mezcladora (HOBART)
- moldes acrílicos de cubos de 2cm x 2cm x 2cm
- mesa de flujo ( norma NTC 111)
- espátula
- tamices
- molde metálicos de cubo de 2 x 2 x 2 pulgadas
- balanza digital
- compactador de madera
- máquina de ensayos universal (Tinius Oisen h50ks)
- horno



**Figura 2.** Diagrama del desarrollo Experimental.

## 4.2 Revisión bibliográfica

A lo largo del proyecto de investigación se llevó a cabo búsqueda y revisión bibliográfica en libros y artículos científicos de revistas especializadas, relacionados con el proyecto de investigación, con el fin de recolectar información que fue utilizada como guía para los diferentes diseños y procedimientos experimentales desarrollados a lo largo del presente trabajo de grado. Adicionalmente, se consultaron normas técnicas nacionales e internacionales para la caracterización y clasificación de los morteros de pega.

## 4.3 Materiales: selección, adecuación y caracterización

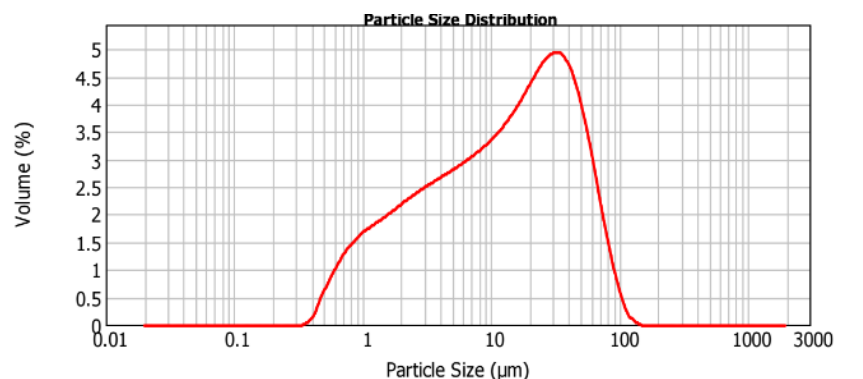
Los materiales se caracterizaron y adecuaron con el objetivo de conocer sus propiedades físicas y químicas, y garantizar que cumplan las especificaciones para la realización de los morteros de pega.

La puzolana natural y escoria siderúrgica utilizada en esta investigación es una materia prima perteneciente a cementos ARGOS en el marco del proyecto de investigación PUZOGEOH.

Mediante un análisis granulométrico se caracterizó la Puzolana, escoria siderúrgica, ceniza volante y el cemento portland Argos tipo UG utilizado como referencia. Se utilizó un analizador de tamaño de partículas modular con tecnología de difracción láser Mastersizer 2000 con accesorio Hydro 2000MU para cada uno de los casos.

### 4.3.1 Puzolana natural

Los resultados obtenidos de la distribución de tamaño de partícula para la puzolana muestran una curva unimodal, véase figura 3. El tamaño medio partícula de 20,63  $\mu\text{m}$ .



**Figura 3.** Grafica de Distribución de tamaño de partícula de la Puzolana natural (PN).



El Análisis de la composición química para la puzolana, se realizó en un espectrómetro de fluorescencia de rayos X, MagixPro PW-2440 Philips equipado con un tubo de Rodio, con una potencia máxima de 4 KW. Este equipo tiene una sensibilidad de 200ppm (0.02%) en la detección de elementos pesados metálicos.

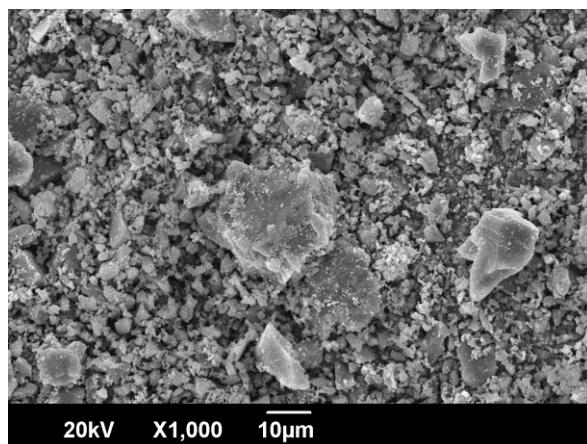
Los resultados obtenidos en forma de compuestos y/o de elementos, se presentan a continuación en la tabla 3.

**Tabla 3.** Composicion Quimica de la Puzolana (PN).

| <b>Elemento y/o compuesto</b>  | <b>XRF-3812 Puzolana (% en peso)</b> |
|--------------------------------|--------------------------------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 61.995                               |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.521                               |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 7.328                                |
| CaO                            | 5.189                                |
| Na <sub>2</sub> O              | 4.066                                |
| MgO                            | 2.493                                |
| K <sub>2</sub> O               | 1.591                                |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.774                                |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.206                                |
| MnO                            | 0.129                                |
| Ba                             | 0.082                                |
| S                              | 0.026                                |
| Cr                             | 0.017                                |
| Zr                             | 0.013                                |
| LOI*                           | 0.480                                |

*\*LOI= pérdida por incineración.*

La Puzolana fue caracterizada también por microscopia electrónica de barrido, lo cual se llevó a cabo un microscopio JEOL Modelo JSM 6490 LV en el modo de electrones retrodispersados mediante un voltaje de aceleración de 20kV tal como se presenta en la figura 4.

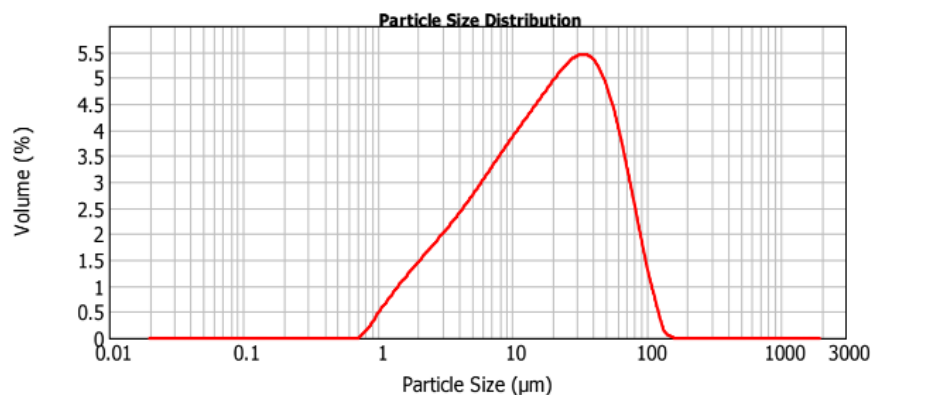


**Figura 4.** Imagen de SEM de la Pozzolana.

Las partículas de la PN, como se muestra en el SEM son de forma y tamaño irregulares, la puzolana natural se aprecia que se compone de aproximadamente 82.84 % de óxido de sílice, alúmina y hierro, teniendo un porcentaje de inquemados del 0.480%.

#### 4.3.2 Escoria siderúrgica

Los resultados obtenidos de la distribución de tamaño de partícula Presenta un tamaño medio partícula de 26,44 µm. Véase figura 5.

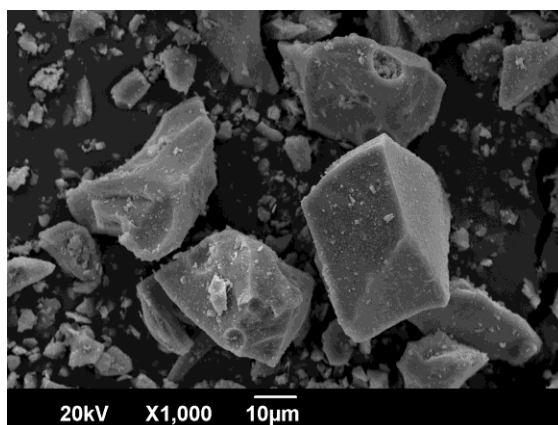


**Figura 5.** Grafica de Distribución de tamaño de partícula de la Escoria siderurgica (GBFS).

Los resultados obtenidos del análisis de composición química para la escoria es presentada en la tabla 4. En la figura 6, se presenta la morfología de la escoria mostrándose las partículas irregulares y angulares.

**Tabla 4.** Composicion Quimica de la Escoria siderugica (GBFS).

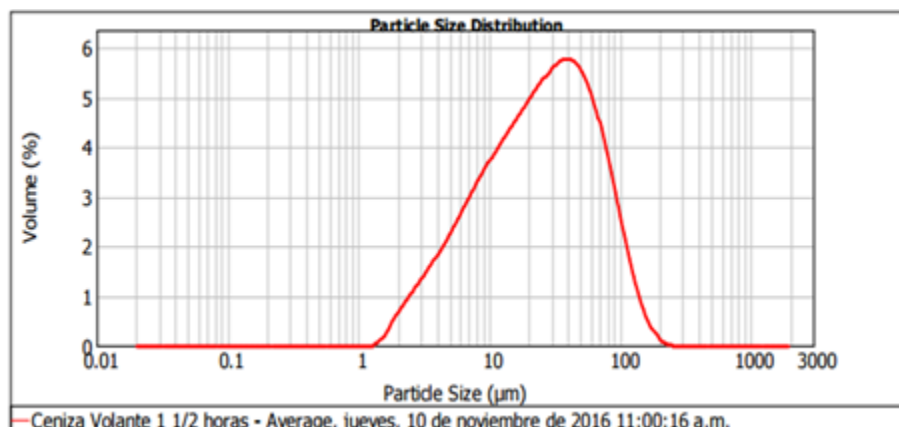
| Elemento y/o compuesto         | XRF-3838 Escoria (% en peso) |
|--------------------------------|------------------------------|
| CaO                            | 40.304                       |
| SiO <sub>2</sub>               | 37.742                       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 15.687                       |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 1.850                        |
| MnO                            | 1.613                        |
| MgO                            | 1.302                        |
| K <sub>2</sub> O               | 0.400                        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0.500                        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0.203                        |
| P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0.190                        |
| S                              | 0.097                        |
| Sr                             | 0.066                        |
| Zr                             | 0.024                        |



**Figura 6.** Imagen de SEM de la Escoria.

#### **4.3.3 Ceniza volante**

En el presente estudio se utilizó una ceniza volante subproducto de la combustión del carbón de una caldera ubicada en una planta papelera, empresa PROPAL, La cual fue sometida a un proceso de molienda. Este se llevó a cabo en un molino de bolas, donde se utilizó una carga de 2000 gr de ceniza empleando 110 cuerpos molidores durante una hora y media. Después del proceso de molienda se obtuvo un tamaño medio de partícula de 35,006  $\mu\text{m}$ . En la Figura 7 se observa la distribución granulométrica del material.



**Figura 7.** Gráfica de la distribución granulométrica de la Ceniza Volante.

Los resultados obtenidos del análisis de composición química para la ceniza volante son presentados en la tabla 5.

**Tabla 5.** Composicion Quimica de la ceniza (CV).

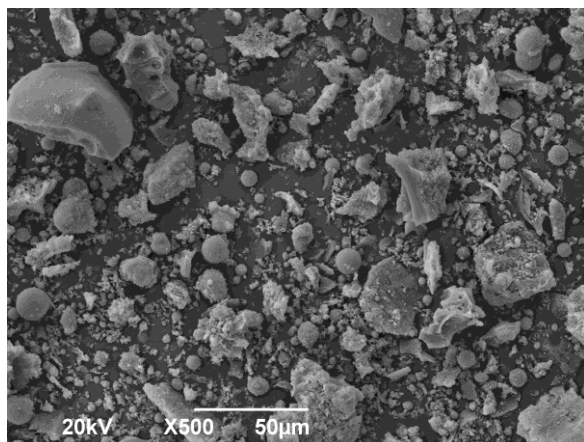
| Compuesto y/o Elemento         | (% en peso) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 28,11       |
| Na <sub>2</sub> O              | 1,09        |
| CaO                            | 2,34        |
| MgO                            | 0,83        |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 17,47       |
| P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,26        |
| SO <sub>3</sub>                | 3,73        |
| K <sub>2</sub> O               | 0,65        |
| TiO <sub>2</sub>               | 1,03        |
| MnO                            | 0,02        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 5,27        |
| Co <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 0,02        |
| NiO                            | 0,02        |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,12        |
| ZnO                            | 0,05        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,03        |
| LOI                            | 38,76       |

*\*LOI= pérdida por incineración.*

con respecto a la ceniza volante se aprecia que se compone de óxidos de sílice, alúmina y hierro aproximadamente en un 50,85% cumpliendo así el requisito definido en la norma ASTM C618-12 (50% mínimo) para ceniza volante tipo C, sin embargo su contenido en oxido de calcio es relativamente bajo (2,34%) y generalmente este tipo de cenizas reportan órdenes superiores al 10%. Es de

destacar el alto contenido de inquemados (LOI=38,76%), que supera ampliamente el definido en la norma (6% máximo). Estas últimas características limitan el uso de este material en el campo de las adiciones puzolánicas.

La morfología observada mediante los resultados del SEM, figura 8, muestra la forma típica de las cenizas volantes, las cuales son de geometría esférica. Esto se atribuye al hecho de que las cenizas volantes se produce por la fusión de las partículas pequeñas y ligeras que permanecen suspendidas en la cámara de combustión y son capturados después por los equipos de captación electrostática.



**Figura 8.** Imagen de SEM de la Ceniza.

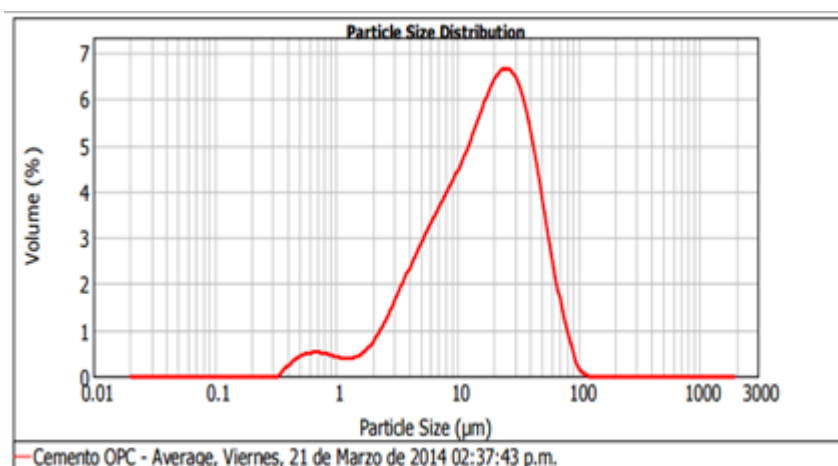
También se puede observar que presentan muchas formas irregulares lo cual se puede atribuir a la temperatura de combustión, ya que si ésta temperatura es baja por lo general se tienen formas irregulares, y a la inversa, si la temperatura es alta su forma es más definida (esférica) y regular, (Paz, 1993).

#### **4.3.4 Cemento portland Tipo UG.**

El cemento tipo UG se utilizó como cementante de referencia para la obtención de morteros estándar y como adicción en el cemento híbrido utilizado para los morteros de ceniza volante, El tamaño de partícula del cemento es de 21,650 µm, para su determinación se utilizó la técnica de granulometría láser. En la Figura 9 se puede observar la distribución granulométrica.

Los resultados obtenidos del análisis de composición química para el cemento portland tipo UG es presentada en la tabla 6. La muestra en polvo fue previamente secada a 105°C para posteriormente ser mezclada con cera Merck en relación 10:1 (10 gr de muestra y 1 gr de cera) para análisis de fluorescencia de rayos X, la cual una vez homogenizada fue llevada a una prensa hidráulica a 196 KN generando una pastilla de 40 mm. El análisis de la muestra se realizó en un tiempo de 20 min Especificaciones del equipo. Para el ensayo se utilizó un

Espectrómetro de Fluorescencia de Rayos X secuencial por longitud de onda dispersiva (WDXRF) marca PANalytical modelo AXIOS mAX, equipado con un tubo de Rodio con una potencia máxima de 4.0 KW, software SuperQ versión 5.0L – Estándares de la base de datos OMNIAN, para análisis semicuantitativo y la detección de elementos desde el Sodio (Na) hasta el Uranio (U).



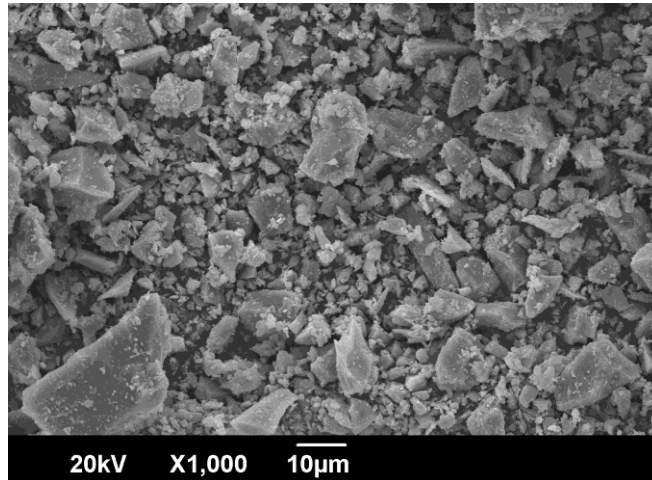
**Figura 9.** Gráfica de distribución granulométrica del cemento portland uso general.

**Tabla 6.** Composición química del cemento portland.

| Compuesto y/o Elemento         | (% en peso) |
|--------------------------------|-------------|
| SiO <sub>2</sub>               | 17,99       |
| Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 3,88        |
| CaO                            | 62,28       |
| MgO                            | 1,71        |
| Na <sub>2</sub> O              | 0,23        |
| P <sub>2</sub> O <sub>3</sub>  | 0,15        |
| SO <sub>3</sub>                | 4,03        |
| K <sub>2</sub> O               | 0,32        |
| TiO <sub>2</sub>               | 0,27        |
| MnO                            | 0,03        |
| Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 4,76        |
| V <sub>2</sub> O <sub>5</sub>  | 0,02        |
| ZnO                            | 0,01        |
| Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 0,03        |
| LOI                            | 4,14        |

*\*LOI= pérdida por incineración.*

En la figura 10 se puede apreciar la morfología del cemento portland, forma irregular.

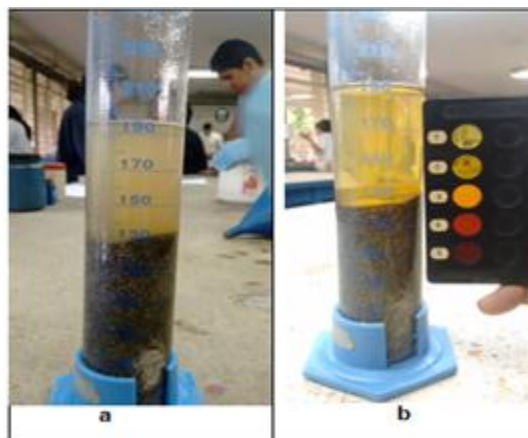


**Figura 10.** Imagen de SEM del cemento portland tipo UG.

#### 4.3.5 Arena Natural

Los agregados utilizados en morteros de mampostería deben cumplir los requisitos estipulados por la NTC 240:

La determinación de las impurezas orgánicas en el agregado fino se realizó el procedimiento según lo indica la norma NTC 127, el cual consiste en llenar una probeta graduada con 130 gramos de arena posteriormente se le adiciona una solución de hidróxido de sodio. Como se muestra en la figura 11, se selló la probeta y se agito vigorosamente, se mantuvo la solución por 24 horas para luego realizar una comparación visual con la Escala Colorimétrica de Gardner.



**Figura 11.** Método de ensayo para determinar las impurezas orgánicas; a). Muestra con agregado fino e hidróxido de sodio; b). Muestra con agregado fino e hidróxido de sodio después de 24 horas.

Al realizar el análisis se observa (véase figura 11, b.) que el color del líquido por encima de la muestra de arena se asemeja al color No.1 de placa orgánica de colores, lo que debe interpretarse que la arena puede ser utilizada para concreto o morteros. Ya que en ocasiones en los agregados finos naturales se presentan impurezas orgánicas, las cuales afectan la hidratación del cemento y el desarrollo consecuente de la resistencia del mortero.

#### **4.3.6 Arena de Ottawa**

Se empleó arena de Ottawa para la realización de morteros de referencia de los materiales estudiados en este trabajo de investigación con el fin de clasificarlos según la norma NTC 121, a compresión; se realizó cubos de mortero a una relación 1:2.75 cementante/ arena de Ottawa, la cual es una arena con alto contenido de sílice, bajo contenido de impurezas y corresponde a una arena estándar que permite trabajar bajo condiciones de norma ASTM C778.

#### **4.3.7 Activadores alcalinos**

Como activadores se empleó hidróxido de sodio (NaOH) y silicato de sodio mediante el uso de disoluciones fuertemente alcalinas basadas en la mezcla de hidróxido de sodio grado industrial (NaOH) (pureza 99%) y silicato sódico comercial ( $\text{Na}_2\text{SiO}_3$ ) ( $\text{SiO}_2=32.09\%$ ,  $\text{Na}_2\text{O}=11.92\%$ ,  $\text{H}_2\text{O}=55.99\%$ ).

#### **4.4 Diseño de las mezclas**

Los diseños de mezcla del material cementante, fueron suministrados por el grupo de investigación GMC, a partir de los cuales se produjeron pastas geopoliméricas las cuales se les evaluó su resistencia a la compresión a los 3, 7 y 28 días de curado. Acorde a los resultados obtenidos a nivel de pastas se realizó el diseño de las mezclas a utilizar en la producción de los morteros de pega, incluyendo la proporción de arena cementante y la dosificación de agua en la mezcla.

Mediante el diseño de mezcla definido en la tabla 7, en donde se presenta las diferentes mezclas a realizar según cada sistema a estudiar en donde se varió la proporción de agregado, se procede a obtener los morteros de los distintos materiales para su caracterización, haciendo los ajustes que sean requeridos para cumplir las especificaciones de la NSR-10 capítulo D.

Los criterios utilizados en la preparación de las mezclas fueron:



**Tabla 7.** Relación de las mezclas para los morteros a desarrollar

| Material | Cementante: Arena |     |     |
|----------|-------------------|-----|-----|
|          | 1:1               | 1:2 | 1:3 |
| CV-OPC   | CV1               | CV2 | CV3 |
| PN-GBFS  | PG1               | PG2 | PG3 |

- Se utilizó cemento portland UG para la realización de los morteros de referencia a lo largo de esta investigación.
- Se elaboraron diferentes morteros con distintos materiales precursores ceniza volante, escoria de alto horno y puzolana natural caracterizados previamente.
- Para el desarrollo de los morteros de pega se empleó arena caracterizada según la NTC 127 y agua limpia libre de sustancias perjudiciales como el aceites , ácidos , alcoholes , sales y materias orgánicas .

#### **4.4.1 Dosificación del material cementante**

Las mezclas se realizaron con base a una dosificación para 100 gramos de precursor (PN o CV), aportada por el grupo de investigación de materiales compuestos (GMC), la relación liquido/sólido (L/S) utilizada a nivel de pastas para los sistemas de PN–GBFS y CV-OPC fue de 0.20 y 0.40, respectivamente. Caracterización de las pastas geopoliméricas

El proceso de mezclado llevado a cabo para la obtención de las pastas PN- GBFS y CV-OPC fue el definido en el Grupo.

#### **4.4.2 Caracterización mecánica de las pastas**

Se moldearon 9 cubos de 2cm x 2 cm x 2cm por cada sistema evaluado siendo estos curados bajo condiciones normalizadas hasta la edad de su respectivo ensayo, a una temperatura de 25 °C y humedad relativa de 80%, se dejó transcurrir un lapso de tiempo de 24 horas para desmoldar como se observa en la figura 12, estos fueron evaluados a 3, 7 y 28 días a compresión, los resultados de resistencia mecánica obtenidos para estos sistemas se presentan en la tabla 8.



**Figura 12.** Cubos de pasta geopoliméricos (a) de PN-GBFS, (b) de CV-OPC después de 24h de desmoldarse

**Tabla 8.** Resistencia a compresión de la pastas geopoliméricas PN-GBFS y CV-OPC .

| Edad de curado (Días) | PN-GBFS Resistencia a compresión (Mpa) | Desviación Estándar | CV-OPC Resistencia a compresión (Mpa) | Desviación Estándar $\sigma$ |
|-----------------------|--|---------------------|---------------------------------------|------------------------------|
| <b>3</b>              | 51,10                                  | 4.07                | 6,31                                  | 0.8                          |
|                       | 51,58                                  |                     | 7,90                                  |                              |
|                       | 44,31                                  |                     | 7,14                                  |                              |
| <b>Promedio:</b>      | <b>49,00</b>                           |                     | <b>7,12</b>                           |                              |
| <b>7</b>              | 61,28                                  | 18.56               | 14,09                                 | 0.72                         |
|                       | 44,42                                  |                     | 14,20                                 |                              |
|                       | 81,48                                  |                     | 15,38                                 |                              |
| <b>Promedio:</b>      | <b>62,39</b>                           |                     | <b>14,56</b>                          |                              |
| <b>28</b>             | 92,67                                  | 12.50               | 29,82                                 | 0.21                         |
|                       | 69,18                                  |                     | 29,90                                 |                              |
|                       | 73,50                                  |                     | 29,50                                 |                              |
| <b>Promedio:</b>      | <b>78,45</b>                           |                     | <b>29,74</b>                          |                              |

Se puede ver como significativamente el % de inquemados afecta la activación de los materiales precursores de la resistencia a la compresión en donde se tuvo que para la puzolana natural con un LOI=0,480% se obtuvo una resistencia a la compresión de 78,45 MPa a 28 días, en comparación con la ceniza volante que su porcentaje de inquemados es de (LOI=38,76%), alcanzaron 29,74 MPa a la edad de 28 días.

Palomo et al., estudiaron tanto el comportamiento mecánico como los productos de reacción generados en sistemas híbridos que contenían proporciones de clinker de cemento Portland menores (30%) y altos contenidos de ceniza volante (70%) (Palomo A., 2007), en donde los materiales cementicios fueron mezclados con agua desionizada y dos soluciones alcalinas y curadas a temperatura ambiente. El desarrollo mecánico alcanzado por los sistemas cementicios varió en gran medida con la hidratación de los líquidos utilizados. Concluyen que la hidratación del cemento Portland se ve afectada por el contenido de álcalis (la concentración de  $\text{OH}^-$ ) y la presencia de sílice soluble. Además, la activación de las cenizas volantes a temperatura ambiente fue acelerada por la presencia de clinker del cemento Portland. Este efecto beneficioso puede explicarse por el calor liberado durante la hidratación del cemento; La energía favoreció las reacciones químicas que indujeron la disolución de cenizas, fraguado y endurecimiento. Por ende se tiene en cuenta la utilización de un sistema híbrido como el de CV-OPC para la producción de morteros, con el fin de obtener mejores propiedades mecánicas a tempranas edades.

La activación alcalina de cenizas volantes es un proceso químico que permite la transformación de determinadas estructuras, parcial o totalmente amorfas o metaestables, en compactos esqueletos cementantes (Gel N-A-S-H) (García Lodeiro I. et al, 2013). Fernández Jiménez y Palomo sugieren premisas básicas que deben cumplirse para lograr la activación alcalina de los aluminosilicatos: la solubilidad del material debe ser elevada en medios fuertemente alcalinos y la disponibilidad de aluminio y sílice reactiva en el medio debe ser alta (Fernández Jiménez A. y Palomo A., 2003) . Para el caso de la activación de las cenizas volantes tipo F, estos autores recomiendan cumplir las siguientes características para lograr una activación alcalina óptima: Porcentaje de inquemados < 5%, Concentraciones de  $\text{Fe}_2\text{O}_3$  y  $\text{CaO} \leq 10\%$ ,  $\text{SiO}_2$  reactiva > 40%, Tamaño de partícula < 45  $\mu\text{m}$  80-90% y  $\text{Al}_2\text{O}_3$  reactiva  $\geq 18\%$

La utilización del sistema binario PN-GBFS, tomando en cuenta el estudio realizado por Robayo y Mejía, demuestra que la incorporación a la pasta geopolimérica basada en la PN de GBFS favorece el proceso de geopolimerización y la obtención de resistencias a la compresión superiores a los 60 MPa a los 7 días de curado a temperatura ambiente. Esto comprueba los efectos positivos de la adición de GBFS en el fraguado y la obtención de resistencias mecánicas a edades tempranas del material geopolimérico. En el presente estudio se evidencia la obtención de resistencias superiores a los 60 MPa a los 7 días de curado a condiciones normalizadas, tal como se visualiza en la tabla 8. Cabe destacar que la incorporación de GBFS al sistema binario permitió el fraguado y endurecimiento de la pasta geopolimérica a temperatura ambiente.

El comportamiento mostrado en las pastas geopoliméricas adicionadas con GBFS puede ser atribuido al incremento de la proporción de Sílice y Alúmina amorfa en la mezcla, por lo cual en presencia del activador alcalino ( $\text{OH}^-$ ) se promueve la rotura de su estructura ( $\text{Ca-O}$ ;  $\text{Si-O}$  y  $\text{AlO}$ ), generando especies disueltas ( $\text{Ca}^{2+}$ ;  $[\text{H}_2\text{SiO}_4]^{2-}$ ,  $[\text{H}_3\text{SiO}_4]^-$  y  $[\text{HAIO}_4]^-$ )  $^{4-}$  que pueden precipitar una vez alcanzado el máximo valor de concentración y generar la nucleación de aluminatos y silicatos disueltos en el entorno alcalino favoreciendo la formación de un hidrato de C-S-H. Por otra parte, el calcio presente en GFBS podría hacer parte de la estructura de Si-O-Al, compensando la carga de los átomos de aluminio ( $\text{Al}^{3+}$ ) y dando lugar al sistema C-A-S-H en forma simultánea al gel N-A-S-H generado durante la activación alcalina de la PN, esto contribuye a la obtención de una estructura más fuerte y resistente tal como fue el caso del presente estudio (Robayo & Mejía, 2016).

#### **4.5 Evaluación preliminar a nivel de morteros**

De manera preliminar y con el fin de conocer el efecto de la relación material cementante: arena en la fluidez y desempeño mecánico de las pasta optimas, se prepararon morteros geopoliméricos en cubos de 2 cm x 2 cm x 2 cm, para lo cuales se establecieron relaciones precursor/arena de 1:1, 1:2 y 1:3.

Los morteros geopoliméricos se mezclaron de acuerdo a una adaptación del procedimiento descrito en la norma NTC 112 para morteros OPC.

- Mezcla de la pasta geopolimérica, según el sistema (PN o CV).
- Se mezcla la pasta geopolimérica con el agua de mezclado por 30 segundos en mezcla lenta.
- Se adiciona la arena sin detener por 30 segundos
- Mezcla rápida 30 segundos
- Detener y raspar
- Mezclar rápido 60 segundos

#### **4.6 Caracterización de morteros en estado plástico**

##### **4.7.1 Fluidez.**

La fluidez inicial es una propiedad del mortero medida en el laboratorio que nos indica el aumento porcentual en el diámetro de la base de un cono truncado de mortero, cuando este se coloca sobre una mesa de flujo, levantándose mecánicamente y dejándose caer 25 veces.

La fluidez de los morteros se determinó bajo la norma NTC 111, con la cual se logró medir la consistencia de las diferentes mezclas según la ecuación 1 y así poder determinar la cantidad de agua necesaria para lograr un % de Flujo que nos permitió clasificar las mezclas dentro de las especificaciones establecidas en la norma NSR 10 capítulo D 3.4 según su aplicación (Tabla 2).

$$\%Fuidez = \frac{Diametro\ promedio - A}{A} \times 100 \quad (1)$$

A = diámetro real del molde, medido en el momento del ensayo, en mm

## **4.7 Caracterización en estado endurecido**

### **4.8.1 Resistencia a la compresión**

La resistencia a la compresión de los morteros geopoliméricos se determinó de acuerdo a la norma NTC 220, para ello se realizaron cubos de 2 x 2 x 2cm para evaluación de los sistemas preliminares y cubos 2" x 2" x 2" en las mezclas óptimas. Estos fueron curados bajo condiciones normalizadas, a una temperatura de 25<sup>0</sup>C y humedad relativa 80%, siendo estos evaluados a 3, 7 y 28 días de curado.

La resistencia a la compresión es considerada como uno de los parámetros fundamentales para determinar las especificaciones de un mortero de pega, debido a que este debe proporcionar la resistencia adecuada para absorber esfuerzos de tensión y compresión dentro de un sistema constructivo. Es considerada como la base para determinar la compatibilidad de los ingredientes del mortero.

### **4.8.2 Densidad, porosidad y absorción**

Bajo el procedimiento descrito en la norma ASTM C642-13, se calculó la densidad, el porcentaje de absorción de agua y porcentaje de vacíos, para cada uno de los morteros los resultados se ven reflejados en las propiedades físicas del mortero

### **4.8.3 Adherencia al sustrato**

La adherencia es la propiedad física individual más importante de los morteros de mampostería en su estado endurecido. Es también la variable más impredecible, debido a que existen muchas variables que afectan la adherencia, (contenido de aire, cohesión del mortero, colocación y succión de la unidad de mampostería y textura de la superficie de pega) es difícil establecer un solo ensayo de laboratorio

para cada uno de estos aspectos y reproducir resultados, los cuales se aproximen a los resultados de obra.

Por lo cual en este trabajo se implementaron dos métodos adaptados (no estandarizados) para evaluar esta propiedad, estos métodos son descritos a continuación:

#### 4.8.3.1 Adherencia tipo briqueta

El ensayo consiste en la unión de una probeta tipo ocho, las cuales fueron elaboradas con la mezcla de mortero con cemento tipo UG, se dividieron equidistantemente como se puede visualizar en la figura 13. Posteriormente se realizó la adhesión empleando las mezclas de cada sistema óptimo. La adherencia se determinó de manera indirecta por medio de un ensayo a tensión de las briquetas según la norma (NTC119), buscando de esta forma el desprendimiento del mortero de pega que mantenía adherida la probeta. Para la determinación de la resistencia a tracción de los sistemas se anota la carga máxima en el momento de rotura y se calcula la resistencia a la tensión ecuación 2.

$$T = \frac{\text{Carga máxima}}{\text{Area de la probeta}} \quad (2)$$



**Figura 13.** Probetas tipo ocho, separadas a la mitad para la unión con mortero.

El montaje se realizó sobre una superficie plana y limpia, la cual se adecuo para ubicar las probetas a unir, con un espacio de  $(0.8 \pm 0.2)$  cm. Este tipo de unión es generada por el mortero de pega y se evaluó a los 7 y 28 días de curado; se ensayó bajo tracción a una velocidad de carga de 1mm/min en la máquina de ensayos universal de la EIMAT.



**Figura 14.** Determinación de la adherencia de los morteros mediante un ensayo de tensión a probetas tipo briqueta modificadas

#### **4.8 EVALUACIÓN EN ELEMENTOS CONSTRUCTIVOS**

##### **4.9.1 Método de ensayo para determinar la resistencia a la compresión de muretes de mampostería (NTC 3495)**

Se elaboraron muretes inyectados cuyas dimensiones son 52 cm x 32 cm x 12 cm, figura 15, utilizando como mortero de pega la mezcla óptima de cada sistema, este mismo tipo de mortero se utilizó para material de relleno. Para someterlos a compresión a 28 días.



**Figura 15.** Esquema del murete para la elaboración del ensayo.

Según la norma NTC 3495, se tiene una relación para los muretes de altura/espesor de 4.3. Los ladrillos utilizados se sometieron a un proceso de saturación de agua durante 24 horas, se aplicó una capa delgada del mortero, preparado según el tipo sistema, con una llana de borde recto, seguidamente se aplica una capa más gruesa y se coloca la siguiente hilera de ladrillo, el mortero aplicado fue de 1,30 cm de espesor, fue curado con una película impermeable delgada, dos días antes del ensayo se removieron las películas impermeables.

## 5. RESULTADOS Y ANALISIS

### 5.1 Evaluación de la fluidez y resistencia a la compresión de los sistemas geopoliméricos

#### 5.1.1 Morteros de PN-GBFS

Se determinó el % de fluidez de los morteros PN-GBFS como una variable de optimización complementaria a la resistencia a la compresión. El % de fluidez se calculó de acuerdo con la ecuación 1 en analogía al método estandarizado para morteros OPC según la norma NTC 111. En la tabla 9 y 10 se presentan los resultados obtenidos.

**Tabla 9.** Determinación del porcentaje de Flujo de las diferentes mezclas de PN-GBFS.

| Mezcla | Relación<br>Cementante/<br>Arena | *Relación<br>L/S | Cementante<br>(gr) | Agua de<br>mezclado<br>(gr) | % Flujo |
|--------|----------------------------------|------------------|--------------------|-----------------------------|---------|
| PG1    | 1:1                              | 0.64             | 300                | 150                         | 61      |
| PG2    | 1:2                              | 0.51             | 200                | 70.33                       | 114     |
| PG3    | 1:2                              | 0.35             | 200                | 32.85                       | 30      |
| PG4    | 1:2                              | 0.45             | 200                | 55.74                       | 60      |
| PG5    | 1:3                              | 0.97             | 150                | 131.22                      | 52      |
| *PG6   | 1:2                              | 0.4              | 200                | 44.35                       | 70      |





Condiciones del laboratorio: Humedad relativa 60% y temperatura 29 C  $\pm$  2.

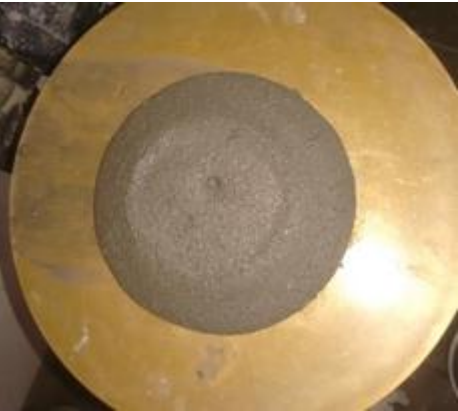

\*A partir de la agua de mezclado se obtuvo la relación líquido-sólido.

\* PG6 cambio de silicato



**Tabla 10.** Mesa de flujo para las diferentes mezclas del sistema PN-GBFS

| Mezcla | %fluj<br>o | Mesa de Flujo  |
|--------|------------|--|
| PG1    | 61         |    |
| PG2    | 114        |   |
| PG3    | 30         |  |
| PG4    | 60         |  |

|     |    |   |
|-----|----|---|
| PG5 | 52 |   |
| PG6 | 70 |  |

Se pudo observar que la mezcla PG1 con una relación 1:1 no presentaba un porcentaje de flujo adecuado, a pesar de que su relación L/S fue de 0,61. Se adiciono más agua de lo que necesitaba la mezcla y esto se ve reflejado en que no se pudo desmoldar dentro de las 24 horas posteriores al mezclado y por eso no se obtuvieron datos de resistencia a los 3 días, tal y como se puede apreciar en la tabla 13.

La mezcla PG2 obtuvo un porcentaje de flujo de 114, dentro del rango que especifica la NTC 111 como óptimo para un mortero estándar OPC. Debido a la cantidad de agua que se adicionó para obtener este nivel de fluidez se vieron afectadas las propiedades mecánicas (tabla 11). Se podría decir que este mortero se puede enmarcar según el porcentaje de flujo y resistencia a la compresión como un mortero tipo M, de acuerdo a la Clasificación de los morteros de pega por propiedad o por proporción tabla 2, según la NSR-10 capítulo D. Sin embargo esta mezcla no se tuvo en cuenta como optima en esta investigación ya que como se observa en la tabla 10, la mezcla presento fenómenos de exudación.

La mezcla PG3 obtuvo una fluidez del 30%, esta mezcla se hizo con el objetivo de evitar el fenómeno de exudación que presentó la mezcla PG2, disminuyéndose la cantidad de agua (relación L/S 0,35) obteniéndose una mezcla muy seca, con

poca trabajabilidad, haciéndola no apropiada para una aplicación como mortero de pega.

**Tabla 11.** Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de PN-GBFS

| Mezcla   | Relación C/a | Relación L/S | Resistencia a la compresión (MPa) |      |        |      |         |      |
|----------|--------------|--------------|-----------------------------------|------|--------|------|---------|------|
|          |              |              | 3 días                            | σ    | 7 días | σ    | 28 días | σ    |
| PG 1     | 1:1          | 0.64         | N/A                               |      | 7.98   | 0.59 | 15.74   | 2.31 |
|          |              |              | N/A                               |      | 9.14   |      | 14.42   |      |
|          |              |              | N/A                               |      | 8.77   |      | 11.24   |      |
| promedio |              |              | N/A                               |      | 8.63   |      | 13.8    |      |
| PG 2     | 1:2          | 0.51         | 4.82                              | 0.23 | 13.87  | 2.22 | 16.54   | 0.38 |
|          |              |              | 4.5                               |      | 9.52   |      | 16.99   |      |
|          |              |              | 4.92                              |      | 10.94  |      | 16.24   |      |
| promedio |              |              | 4.75                              |      | 11.44  |      | 16.59   |      |
| PG 3     | 1:2          | 0.35         | 7.79                              | 0.06 | 16.47  | 4.60 | 36.64   | 1.87 |
|          |              |              | 7.83                              |      | 18.76  |      | 33.30   |      |
|          |              |              | 7.91                              |      | 25.33  |      | 36.44   |      |
| promedio |              |              | 7.84                              |      | 20.19  |      | 36.46   |      |
| PG 4     | 1:2          | 0.45         | 17.60                             | 2.00 | 21.01  | 2.22 | 33.26   | 1.22 |
|          |              |              | 16.18                             |      | 25.43  |      | 32.44   |      |
|          |              |              | 13.65                             |      | 23.56  |      | 30.9    |      |
| promedio |              |              | 15.81                             |      | 23.33  |      | 32.20   |      |

|          |     |      |       |      |       |      |       |      |
|----------|-----|------|-------|------|-------|------|-------|------|
| PG<br>5  | 1:3 | 0.97 | N/A   |      | N/A   |      | N/A   |      |
|          |     |      | N/A   |      | N/A   |      | N/A   |      |
|          |     |      | N/A   |      | N/A   |      | N/A   |      |
| PG<br>6  | 1:2 | 0.4  | 17.23 | 0.34 | 26.50 | 3.80 | 29.88 | 2.16 |
|          |     |      | 17.18 |      | 18.90 |      | 33.55 |      |
|          |     |      | 16.62 |      | 22.45 |      | 29.74 |      |
| promedio |     |      | 17.01 |      | 22.62 |      | 31.06 |      |

**N/A= no aplica**

Con la mezcla PG4, se logró obtener un equilibrio entre los sistemas de la mezcla PG2 y PG3, lográndose disminuir la cantidad de agua para evitar en estos morteros el fenómeno de exudación, pero sin afectar la trabajabilidad, obteniéndose una mezcla de mortero con un porcentaje de flujo de 60%, con una relación liquido/solido de 0.45.

La mezcla PG6, con el cambio de silicato sódico aportado por el GMC, presentó un porcentaje de flujo del 70%, con una relación Liquido/solido de 0.4, lográndose optimizar la cantidad de agua sin afectar las propiedades del mortero. Este fenómeno se presentó debido a que entre los silicatos existía una diferencia notable en su viscosidad.

La mezcla PG5 no se pudo desmoldar a las 24 horas ni a las 72 horas siguientes, por tanto se descartó el estudio de esta mezcla debido a la cantidad de agua que se tenía que adicionar para obtener una fluidez de 52% con una relación de C/a 1:3. Como se puede ver en la figura 16, la mezcla PG5 presenta poca cohesividad incluso después de cumplir un tiempo de curado mayor a 28 días.

De acuerdo con los resultados obtenidos, la mezcla que tuvo mejor comportamiento mecánico y % de fluidez adecuado fue PG6 la cual se eligió como óptima en este sistema, la mezcla PG2, presenta un porcentaje de flujo (115%) que nos permite enmarcarnos dentro de los tipos de morteros M por su fluidez, ver tabla 2, pese a que se obtuvo este % de flujo, presentó fenómenos de exudación debido a que se le adicionó más agua de mezclado que la que demandaba la mezcla lo que ocasionó que no se presentara una buena conglomeración de las partículas



**Figura 16.** Mezcla PG5, a los tres días de curado.

Por lo que se decidió trabajar con un porcentaje de flujo del 70%, ya que para este tipo de materiales con esa % fluidez, se tuvo una buena trabajabilidad del mortero, con una mínima cantidad de agua en la mezcla, sin afectar las propiedades del sistema como lo vemos en las características obtenidas de la mezcla PG6.

#### **5.1.2 Caracterización de la mezcla óptima sistema PN-GBFS**

A partir de los datos obtenidos y de acuerdo con los criterios a tener en cuenta en la NSR-10 capítulo D (tabla 2). Se determina que la mezcla óptima del sistema PN-GBFS es la Mezcla PG6, con una relación cementante/arena 1:2, Líquido/Sólido 0.4 y una fluidez del 70%; la cual se caracteriza por presentar una adecuada manejabilidad, que es una de las propiedades más importantes de un mortero en estado plástico, haciendo que este pueda extenderse fácilmente mediante un palustre en las separaciones y juntas de la unidad de mampostería.

La resistencia a la compresión a tempranas edades es un factor determinante para estos morteros, ya que estos deben soportar la masa de las unidades de mampostería cuando se colocan. La mezcla PG6, en los ensayos preliminares (cubos de 2 cm de lado), presenta buenas resistencias a tempranas edades y a los 28 días alcanza una resistencia a la compresión promedio de  $31 \pm 2$  MPa. Desde el punto de vista mecánico estos valores avalan la mezcla PG6 del sistema PN-GBFS como la óptima con una buena relación de las propiedades generadas y compatibilidad de los materiales que lo conforman.

Se realizaron probetas de cubos de dimensiones 2"x2"x2" para la mezcla óptima del sistema PN-GBFS, las cuales arrojaron resultados descritos en la tabla 12, donde se puede observar que concuerdan con los resultados preliminares de la mezcla PG6, en donde se pudo enmarcar este mortero según la norma NSR-10

capítulo D como un mortero tipo H, con resistencia a la compresión superior a 22,5 MPa descritos en la norma.

**Tabla 12.** Resistencia a la compresión de la mezcla óptima PN-GBFS.

| Mezcla   | Relación<br>C/a | Relación<br>L/S | resistencia a la compresión<br>(MPa) |      |        |      |        |      |
|----------|-----------------|-----------------|--------------------------------------|------|--------|------|--------|------|
|          |                 |                 | 70% flujo                            |      | 3 días | σ    | 7 días | σ    |
| PG6      | 1:2             | 0.4             | 17.28                                | 0.28 | 28.10  | 0.35 | 35.10  | 0.67 |
|          |                 |                 | 17.16                                |      | 28.47  |      | 33.96  |      |
|          |                 |                 | 16.74                                |      | 28.69  |      | 35.15  |      |
| promedio |                 |                 | 17.06                                |      | 28.42  |      | 34.74  |      |

### 5.1.3 Morteros de CV-OPC

Los resultados de la tabla 13, muestran el comportamiento de las diferentes mezclas según la metodología experimental descrita anteriormente para hallar el % de flujo análogo al sistema de mortero OPC según la ecuación 1, en la cual evidenciamos el comportamiento del % de flujo con el cual se optimizó la mezcla del sistema CV-OPC basándose en su comportamiento mecánico y fluidez.

Algunas mezclas de este sistema geopolimérico fueron muy cohesivas por lo cual no se pudieron compactar manualmente, se sometieron a una mesa vibradora para su conformación esto se podría atribuir a una presencia de silicato mayor al sistema anterior, por lo que se concluye que la cohesividad en este sistema geopolimérico depende del contenido del silicato.

Las mezclas CV1 y CV2, aunque ambas presentan un % flujo 115 y 122 respectivamente, en cuestión de trabajabilidad muestran ser demasiado fluidas y no mantenían su forma por su alta cantidad de agua libre de mezclado, como lo requiere un mortero de pega, afectando también su desempeño mecánico, como se logra ver en los resultados obtenidos en las tablas 14 y 15.

**Tabla 13.** Determinación del porcentaje de Flujo de las diferentes mezclas de CV-OPC.





| Mezcla      | Relación<br>Cementante/Arena | Relación<br>L/S | Cementante<br>(gr) | Agua de<br>mezclado<br>(gr) | %<br>Flujo |
|-------------|------------------------------|-----------------|--------------------|-----------------------------|------------|
| <b>CV1</b>  | 1:1                          | 0.51            | 300                | 42.0                        | 115        |
| <b>CV2</b>  | 1:2                          | 0.62            | 200                | 58.9                        | 122        |
| <b>CV3</b>  | 1:3                          | 0.60            | 150                | 40.0                        | 59         |
| <b>CV4*</b> | 1:2                          | 0.50            | 200                | 2621                        | 82         |

\* Optimización de la mezcla CV2 con menor relación L/S

La mezcla CV3, presenta un % flujo de aprox. 60, a pesar de la cantidad de agua suministrada. Resulta ser una mezcla con mayor trabajabilidad permitiendo así la conformación de los cubos para ser evaluados a resistencia a compresión, sin embargo como se puede ver en la tabla 15, sus propiedades mecánicas evaluadas permiten clasificarlo como un mortero Tipo N, según la tabla 2. Aunque no cumpla el requisito de fluidez especificado para morteros estándar OPC.

Se puede ver en la tabla 14, como afecta el agua de mezclado en cada uno de los morteros, concluyendo que entre mayor sea el agregado comparado con el material cementante demanda más agua.

**Tabla 14.** Mesa de flujo para las diferentes mezclas del sistema CV-OPC.

| <b>Mezcla</b> | <b>%flujo</b> | <b>Mesa de flujo</b>   |
|---------------|---------------|--|
| <b>CV1</b>    | <b>115</b>    |    |
| <b>CV2</b>    | <b>122</b>    |   |
| <b>CV3</b>    | <b>59</b>     |  |
| <b>CV4</b>    | <b>82</b>     |  |



**Tabla 15.** Resistencia a la compresión de las diferentes mezclas de CV-OPC.

| Mezcla | Relación<br>Cementante/Arena | Relación<br>L/S | resistencia a la compresión<br>(MPa) |      |        |      |         |      |
|--------|------------------------------|-----------------|--------------------------------------|------|--------|------|---------|------|
|        |                              |                 | 3 días                               | σ    | 7 días | σ    | 28 días | σ    |
| CV1    | 1:1                          | 0,51            | 5,96                                 | 0.18 | 12,43  | 1.90 | 14,25   | 2.40 |
|        |                              |                 | 6,16                                 |      | 9,12   |      | 14,42   |      |
|        |                              |                 | 5,80                                 |      | 9,15   |      | 18,49   |      |
|        | Promedio                     |                 | 5.97                                 |      | 10.23  |      | 15.72   |      |
| CV2    | 1:2                          | 0,62            | 1,94                                 | 0.41 | 9,59   | 0.85 | 9,22    | 0.35 |
|        |                              |                 | 2,52                                 |      | 8,90   |      | 9,81    |      |
|        |                              |                 | 2,72                                 |      | 7,90   |      | 9,18    |      |
|        | Promedio                     |                 | 2.39                                 |      | 8.80   |      | 9.40    |      |
| CV3    | 1:3                          | 0,60            | 4,26                                 | 0.51 | 5,19   | 0.24 | 9,74    | 0.76 |
|        |                              |                 | 4,28                                 |      | 4,73   |      | 9,35    |      |
|        |                              |                 | 5,15                                 |      | 4,83   |      | 10,82   |      |
|        | Promedio                     |                 | 4.56                                 |      | 4.92   |      | 9.97    |      |
| CV4    | 1:2                          | 0.50            | 5.84                                 | 1.56 | 10.45  | 0.97 | 18.88   | 0.58 |
|        |                              |                 | 5.02                                 |      | 9.03   |      | 17.88   |      |
|        |                              |                 | 8.03                                 |      | 8.60   |      | 18.88   |      |
|        | Promedio                     |                 | 6.30                                 |      | 9.36   |      | 18.38   |      |

Buscando una relación entre fluidez y trabajabilidad, se propuso optimizar la mezcla CV2, disminuyendo la cantidad de agua de mezclado, obteniéndose una mayor trabajabilidad y mejor desempeño mecánico con una resistencia promedio a los 28 días de 18,38 MPa, mezcla CV4, aunque presenta ser una mezcla muy cohesiva y de fácil esparcimiento, manteniendo su forma.

#### 5.1.4 Caracterización de la mezcla óptima CV-OPC

La mezcla que obtuvo el mejor comportamiento en cuanto a fluidez y resistencia mecánica fue CV4, se obtuvo 18,38 MPa de resistencia a compresión a la edad de 28 días y % de flujo 82. Posteriormente se mezclaron cubos de 2" x2" x 2" (in) con la dosificación de esta mezcla, los resultados pudieron corroborar los resultados preliminares en la tabla 16.

Dada la Clasificación de los morteros de pega por propiedad, según la NSR-10 capítulo D (ver tabla 2), el sistema CV-OPC se enmarca en un mortero Tipo M, acorde a los resultados de resistencia a la compresión; las demás mezclas fueron descartadas debido a su baja resistencia a compresión, poca relación entre fluidez y trabajabilidad.

**Tabla 16.** Resistencia a la compresión de la mezcla óptima CV-OPC.

| Mezcla      | Relación C/a | Relación L/S | resistencia a la compresión (MPa) |      |        |      |         |      |
|-------------|--------------|--------------|-----------------------------------|------|--------|------|---------|------|
| 80 %fluidez |              |              | 3 días                            | σ    | 7 días | σ    | 28 días | σ    |
| CV4         | 1:2          | 0.5          | 7.27                              | 0.50 | 11.82  | 0.40 | 17.86   | 0.40 |
|             |              |              | 6.28                              |      | 11.13  |      | 18.62   |      |
|             |              |              | 6.86                              |      | 11.84  |      | 18.00   |      |
| Promedio    |              |              | 6.80                              |      | 11.60  |      | 18.16   |      |

## 5.2 SISTEMAS DE REFERENCIA

### 5.2.1 Morteros de OPC

Con el fin de comparar de manera equivalente los morteros geopoliméricos, se realizaron tres mezclas de referencia con cemento portland uso general; una con arena de Ottawa y dos de arena natural con el fin de obtener un mortero de referencia de OPC (Tabla 17), bajo el parámetro de la fluidez como se muestra en la tabla 18.

**Tabla 17.** Mezclas de referencia OPC.

| Mezcla                | Relación Cementante/Arena |
|-----------------------|---------------------------|
| OPC1+Arena natural    | 1:2                       |
| OPC2+Arena natural    | 1:2                       |
| OPC3+ arena de Ottawa | 1:2.75                    |

Se obtuvieron como resultados para las mezclas con arena de Ottawa y natural los presentados en la tabla 18 y 19

**Tabla 18.** Mezclas de referencia OPC.

| Mezcla | Relación C/a | Relación a/c | % flujo | Resistencia a la compresión (MPa) |      |        |      |         |      |
|--------|--------------|--------------|---------|-----------------------------------|------|--------|------|---------|------|
|        |              |              |         | 3 días                            | σ    | 7 días | σ    | 28 días | σ    |
| OPC1   | 1:2          | 0.61         | 107     | 9.44                              | 0.30 | 19.16  | 1.43 | 26.07   | 0.64 |
|        |              |              |         | 8.89                              |      | 17.02  |      | 26.56   |      |
|        |              |              |         | 9.38                              |      | 16.44  |      | 25.30   |      |
|        | Promedio     |              |         | 9.24                              |      | 17.54  |      | 25.98   |      |
| OPC2   | 1:2          | 0.48         | 70      | 8.44                              | 0.34 | 14.63  | 0.96 | 23.96   | 0.48 |
|        |              |              |         | 7.79                              |      | 16.31  |      | 24.34   |      |
|        |              |              |         | 8.28                              |      | 16.27  |      | 24.91   |      |
|        | Promedio     |              |         | 8.17                              |      | 15.74  |      | 24.40   |      |

\* C/a= cementante: Arena

El sistema de referencia OPC1, es un mortero que por su % de fluidez y resistencia a la compresión, se clasifica como un mortero tipo H, según la tabla 2.

El OPC2 es el sistema de referencia de las mezclas óptimas de morteros geopolímeros, ya que se buscó obtener propiedades similares en cuestión de %fluidez, para comparación con respecto a trabajabilidad y resistencia a compresión como se ve en la figura 17.

**Tabla 19.** Mezclas de referencia OPC-Ottawa

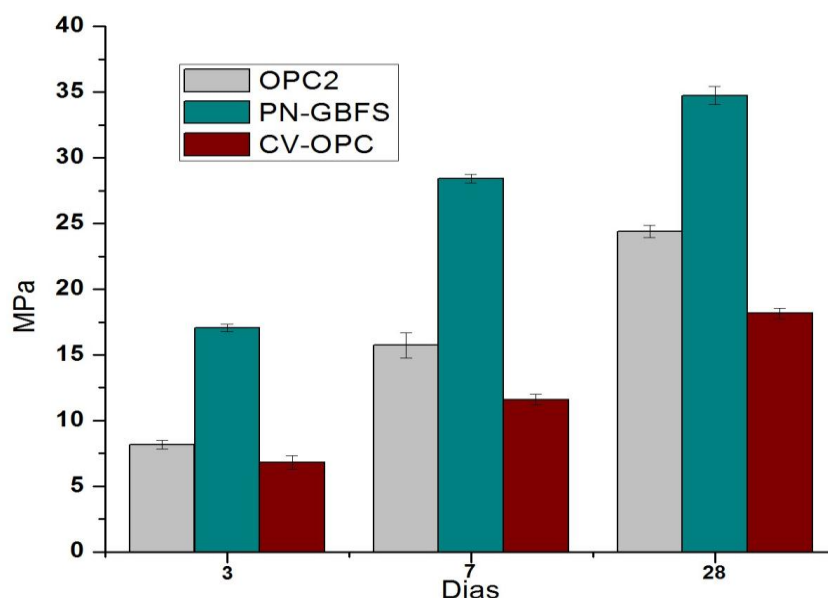
| Mezcla | Relación<br>C/a | Relación<br>a/c | %<br>flujo | resistencia a la compresión<br>(MPa) |      |           |      |            |      |
|--------|-----------------|-----------------|------------|--------------------------------------|------|-----------|------|------------|------|
|        |                 |                 |            | 3<br>días                            | σ    | 7<br>días | σ    | 28<br>días | σ    |
|        |                 |                 |            |                                      |      |           |      |            |      |
| OPC3   | 1:2,75          | 0.5             | 110        | 5.76                                 | 0.62 | 14.83     | 0.92 | 23.82      | 0.64 |
|        |                 |                 |            | 7.00                                 |      | 16.22     |      | 23.57      |      |
|        |                 |                 |            | 6.48                                 |      | 16.57     |      | 22.61      |      |
|        | Promedio        |                 |            | 6.41                                 |      | 15.87     |      | 23.33      |      |

Se realizaron mezclas de referencia con cada uno de los sistemas geopoliméricos mencionados anteriormente y arena de Ottawa con relación de norma de 1:2.75. (Cementante: arena) con el fin de enmarcar según la NTC 121 tercera actualización, los requisitos mínimos a compresión. El sistema PN-Ottawa se comporta mecánicamente a compresión como un cemento tipo UG, mientras que la CV-Ottawa no se pudo enmarcar bajo las condiciones requeridas de resistencia (Tabla 20).

**Tabla 20.** Mezclas de los sistemas óptimos con arena de Ottawa.

| Mezcla    | Relación C/a | Relación a/c | % flujo | Resistencia a la compresión (MPa) |      |        |      |         |      |
|-----------|--------------|--------------|---------|-----------------------------------|------|--------|------|---------|------|
|           |              |              |         | 3 días                            | σ    | 7 días | σ    | 28 días | σ    |
| PN-Ottawa | 1:2,75       | 0,50         | 110     | 11,37                             | 0,53 | 21,24  | 0,81 | 28,73   | 0,47 |
|           |              |              |         | 10,37                             |      | 20,51  |      | 29,27   |      |
|           |              |              |         | 10,59                             |      | 19,63  |      | 28,33   |      |
|           | Promedio     |              |         | 10.77                             |      | 20.46  |      | 28.77   |      |
| CV-Ottawa | 1:2,75       | 0,57         | 110     | ---                               |      | 4,42   | 0,22 | 9.35    | 0,86 |
|           |              |              |         | ---                               |      | 4,33   |      | 8,18    |      |
|           |              |              |         | ---                               |      | 4,75   |      | 9,86    |      |
|           | Promedio     |              |         |                                   |      | 4.5    |      | 9.13    |      |

De las mezclas que se prepararon por cada sistema se eligieron dos mezclas óptimas geopoliméricas y la mezcla de referencia OPC2 para comparar su comportamiento en resistencia a la compresión ya que estas mezclas tienen el mismo parámetro de proporción 1:2 y aproximadamente el mismo porcentaje de flujo. En la figura 17 se observa que el sistema que desarrolló la mayor resistencia a la compresión fue el sistema PN-GBFS, seguido de sistema OPC y por último el sistema CV-OPC, ambos sistemas geopoliméricos cumplen la norma NSR-10 capítulo D en cuanto a resistencia.



**Figura 17.** Gráfico de Resistencia a la compresión de los sistemas geopoliméricos con respecto al del OPC.

La mezcla de Ceniza volante presenta una resistencia a la compresión baja con respecto a las demás, esto se debe al porcentaje alto de carbón que no se ha quemado presentes en la materia prima (38.76%); estudios realizados para evaluar el efecto de las características físicas y químicas de cenizas volantes provenientes de diferentes fuentes las propiedades de resistencia mecánica concluyeron que para lograr una activación alcalina óptima la ceniza volante debe poseer un contenido alto de fase vítrea, un 80% de partículas de tamaño inferior a 45  $\mu\text{m}$  y un porcentaje inferior al 5% de pérdidas por ignición (Fernández-Jiménez, 2003).

A partir de las propiedades evaluadas en esta investigación y la clasificación NSR-10, los morteros geopoliméricos se clasifican como morteros de pega, tal como es especificado en la tabla 21.

**Tabla 21.** Clasificación de los Morteros geopoliméricos por propiedad.

| Mortero de pega | Especificación de los morteros por propiedad |                  |              |        |                               |
|-----------------|--|------------------|--------------|--------|-------------------------------|
|                 | Resistencia a compresión mínima 28d (MPa)    | Tipo de Material | Relación L/S | %Flujo | Proporción Cementante / arena |
| H               | 31,06  | PN+GBFS          | 0,40         | 70     | 1:2                           |
| M               | 18,38  | CV-OPC           | 0,50         | 80     | 1:2                           |
| N               | 9,13   | CV-Ottawa        | 0,57         | 110    | 1:2,75                        |

### 5.3 Densidad, absorción y porosidad

Se determinó la Densidad, Absorción y porosidad con el fin de conocer estas propiedades de estos materiales, en comparación con los sistemas de referencia, mortero de OPC, y la relación con su desempeño mecánico, siguiendo el procedimiento descrito en la norma ASTM C642-13 y se obtuvo los datos de la tabla 22.

**Tabla 22.** Datos reportados de densidad, absorción y porosidad.

| Mezcla  | Peso A (g) | Peso B (g) | Peso C (g) | peso D (g) | % Absorción  | Densidad Aparente (g/cm <sup>3</sup> ) | % poros      |
|---------|------------|------------|------------|------------|--------------|--|--------------|
| OPC1    | 251,7      | 284,9      | 286,6      | 151,3      | 13,87        | 2,51                                   | 25,79        |
|         | 248,0      | 281,1      | 282,3      | 148,5      | 13,83        | 2,49                                   | 25,64        |
|         | 248,9      | 283,6      | 284,2      | 149,2      | 14,18        | 2,50                                   | 26,15        |
|         | Promedio   |            |            |            | <b>13,96</b> | <b>2,50</b>                            | <b>25,86</b> |
| OPC2    | 250,7      | 282,0      | 282,7      | 148,7      | 12,76        | 2,46                                   | 23,88        |
|         | 250,8      | 282,2      | 282,6      | 149,0      | 12,68        | 2,46                                   | 23,80        |
|         | 255,0      | 285,3      | 286,6      | 151,4      | 12,39        | 2,46                                   | 23,37        |
|         | Promedio   |            |            |            | <b>12,61</b> | <b>2,46</b>                            | <b>23,69</b> |
| PN-GBFS | 235,0      | 258,3      | 258,8      | 137,0      | 10,13        | 2,40                                   | 19,54        |
|         | 257,8      | 279,1      | 279,4      | 150,2      | 8,38         | 2,40                                   | 16,72        |
|         | 241,0      | 261,0      | 261,5      | 140,0      | 8,51         | 2,39                                   | 16,87        |
|         | Promedio   |            |            |            | <b>9,00</b>  | <b>2,39</b>                            | <b>17,71</b> |
| CV-OPC4 | 212,8      | 248,0      | 255,5      | 128,0      | 20,07        | 2,51                                   | 33,49        |
|         | 217,9      | 253,1      | 260,8      | 130,9      | 19,69        | 2,50                                   | 33,03        |
|         | 221,1      | 257,5      | 264,6      | 132,9      | 19,67        | 2,51                                   | 33,03        |
|         | Promedio   |            |            |            | <b>19,81</b> | <b>2,51</b>                            | <b>33,18</b> |


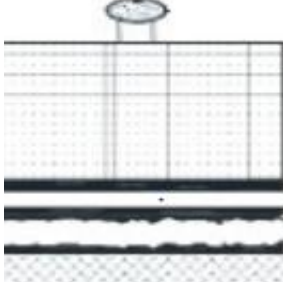
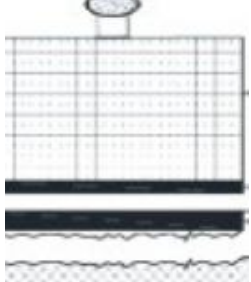
Los resultados en la tabla 22, muestran que el agua el agua en el mortero pese a que aumenta su trabajabilidad, también aumentará la porosidad debido a la evaporación de agua libre de mezclado durante el proceso de curado (Sathia, babu, & Santhanam, 2008). La mezcla con menor % absorción, densidad aparente y % de poros fue la mezcla compuesta por PN-GBFS, donde nos confirma la presencia de una matriz más densa y compacta (Chotetanorm, 2012) , Esta propiedad se ve reflejada en la resistencia a la compresión obtenida (figura 17), en comparación con el sistema CV-OPC que obtuvo la mayor porosidad esto se atribuye a que demandó más agua para obtener una fluidez (80%) lo que se ve reflejado en las propiedades mecánicas del mortero.

#### 5.4 Evaluación de la adherencia

Dado el procedimiento descrito en la metodología a realizar en esta investigación, la adherencia fue evaluada bajo sistema tipo briqueta; y se analizó la característica de falla que se presentó en cada cementante.

La NTC 6050-2, nos describe algunos de los patrones de fallas que se presentan con su respectiva representación gráfica, ver tabla 23.

**Tabla 23.** Patrones de falla, NTC 6050-2

| PATRONES DE FALLA  |   |  |
|--|---|--|
| <b>Falla adhesiva AF –S :</b><br>Falla que ocurre en la interfase entre el adhesivo y el sustrato. | <b>Falla cohesiva dentro del adhesivo CF- A :</b><br>La falla ocurre dentro de la capa del adhesivo | <b>Falla cohesiva en el sustrato CF-S:</b><br>La falla ocurre en el sustrato o dentro del cuerpo |
|                 |                  |             |

El sistema que presentó mayor adherencia fue el sistema de CV-OPC según los datos registrados en la tabla 24, teniendo una falla cohesiva dentro del adhesivo. La fractura de la unión adhesiva se ha producido en el propio material

adhesivo, se pueden observar restos de adhesivos en ambas superficies del sustrato como se observa en la figura 18.

**Tabla 24.** Resultados de adherencia sistema tipo briqueta.

| SISTEMA                    | OPC2         | PN-GBFS      | CV-OPC       |
|----------------------------|--------------|--------------|--------------|
| Adherencia                 | Mpa          | Mpa          | Mpa          |
| 7 Días                     | 0,213        | 0,616        | 0,572        |
|                            | 0,189        | 0,415        | 0,628        |
|                            | 0,204        | 0,489        | 0,515        |
| <b>promedio</b>            | <b>0,202</b> | <b>0,507</b> | <b>0,572</b> |
| <b><math>\sigma</math></b> | 0,012        | 0,102        | 0,06         |
| 28 Días                    | 0,505        | 0,657        | 1,503        |
|                            | 0,698        | 0,601        | 0,806        |
|                            | 0,642        | 0,532        | 1,326        |
| <b>promedio</b>            | <b>0,615</b> | <b>0,597</b> | <b>1,212</b> |
| <b><math>\sigma</math></b> | 0,099        | 0,063        | 0,362        |



**Figura 18.** Falla CV-OPC cohesiva dentro del adhesivo CF- A.

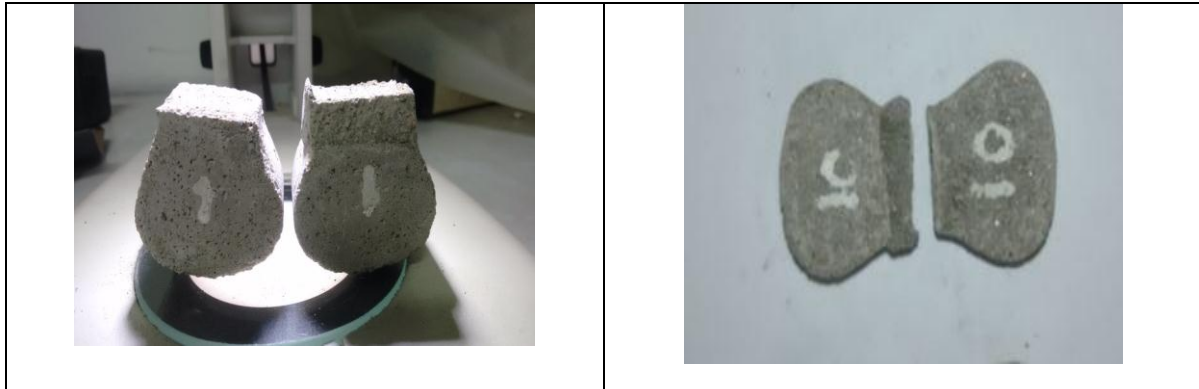
Dados los resultados del ensayo Tabla 24, el sistema que presento menor adherencia fue la PN-GBFS a 28 días comparado con el sistema de referencia OPC2, con ello podemos concluir que la adherencia no es una propiedad que se pueda predecir con base en la resistencia a la compresión, tal como se vio en el caso del sistema CV-OPC.

La falla que presentaron los sistemas OPC2, PN-GBS fue adhesiva, la fractura de la unión adhesiva se ha producido en la zona de adhesión entre el adhesivo y el sustrato, en dicha fractura el mortero de pega se encuentra totalmente separado



de la superficie del sustrato figuras 19 y 20. La resistencia del sustrato es mayor que la resistencia de la unión adhesiva.

Cuando se diseña una unión adhesiva se pretende que la rotura no sea en ningún caso adhesiva, es decir, que la separación nunca se produzca en la interfase sustrato-adhesivo ( (Martín & Orgilés, 1991).



**Figura 19.** Falla OPC adhesiva AF-S.



**Figura 20.** Falla PN- GBFS adhesiva AF-S.

### **5.5 Evaluación de la parte aplicativa**

La trabajabilidad de los morteros geopolímeros se evaluó en condiciones de servicio, con el fin de validar la relación existente entre trabajabilidad y % de flujo obtenido en los resultados anteriores. Teniendo la posibilidad de ser aplicados como morteros para pañete, aplicándose sobre una pared estructural, formándose una capa delgada del mortero, y siendo expuesto a la intemperie.

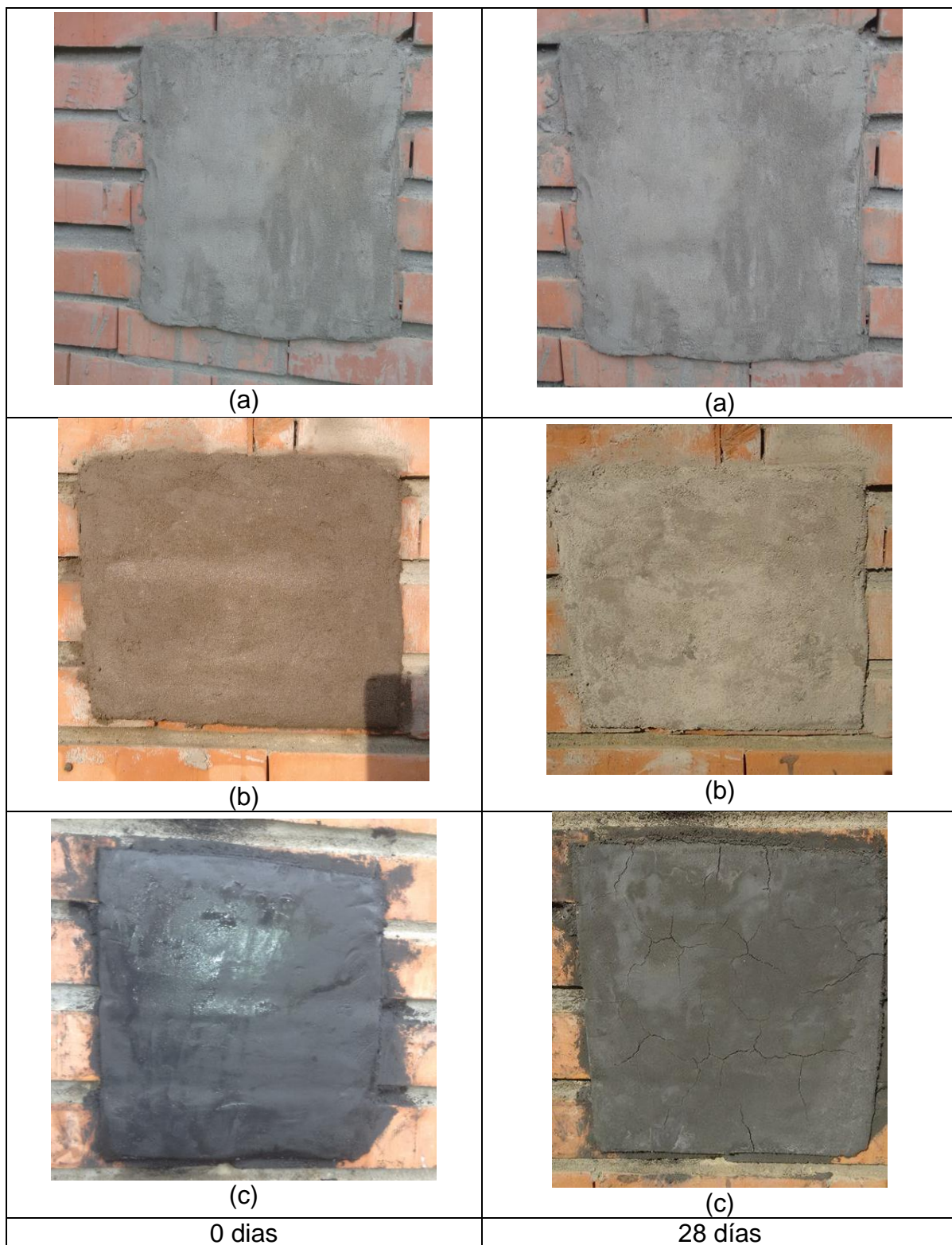


**Figura 21.** Aplicación del mortero como posible mortero pañete.

La manejabilidad es una de las propiedades más importantes de un mortero en estado plástico, este debe extenderse fácilmente mediante un palustre en las separaciones y juntas de la unidad de mampostería. El Mortero de PN-GBFS presento buena manejabilidad, dejándose extender y aplicar por medio de una llana, como se observa en la figura 21; teniendo buena compatibilidad con las unidades de mampostería como posible aplicación de mortero de pañete.

En cuestión de manejabilidad el mortero de CV-OPC, presenta un fraguado en un intervalo de tiempo de 8-10 minutos por lo cual hace que la mezcla comience a comportarse a través del tiempo más cohesiva, presentando una consistencia seca, dificultando su libre esparcimiento y aumentando su adherencia, quedándose material adherido a la llana e incluso desprendiendo el material ya aplicado.

Estos morteros aplicados se curaron por 3 días, siendo cubiertos con una película plástica. A los 7 días la mezcla de mortero CV-OPC comienza a presentar fisuras por la contracción ejercida, es atribuida a que la capa más externa era propensa a secarse más rápido por las condiciones ambientales, generando una diferencia de esfuerzos que se ve reflejada en fisuras del mortero, tal como se visualiza aun a los 28 días en la figura 22, c.



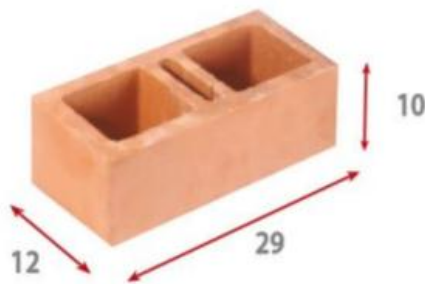
**Figura 22.** Morteros expuestos a condiciones ambientales como pañetes. (a) OPC2. (b) PN-GBFS. (c) CV-OPC.

### 5.5.1 Evaluación de resistencia a la compresión de muretes

Se realizaron muretes inyectados de OPC , PN-GBFS y CV-OPC de 52 cm X 32 cm x 12 cm, utilizando ladrillos estructurales clasificación tipo PV, ver especificaciones técnicas en la tabla 25, aportados para esta investigación por el GMC. Con el fin de conocer bajo condiciones aplicativas el comportamiento del mortero de pega dentro de un sistema constructivo.

Se agregó el mortero de relleno en las cavidades, después de cada consolidación, luego se enraso y retiró el exceso, y se dio un acabado a la superficie del mortero de relleno, de manera que quedo al ras con la parte superior del murete y en contacto con las unidades. Inmediatamente se selló con películas impermeables; no se movieron y ni perturbaron los muretes durante las primeras 48 h después de su elaboración.

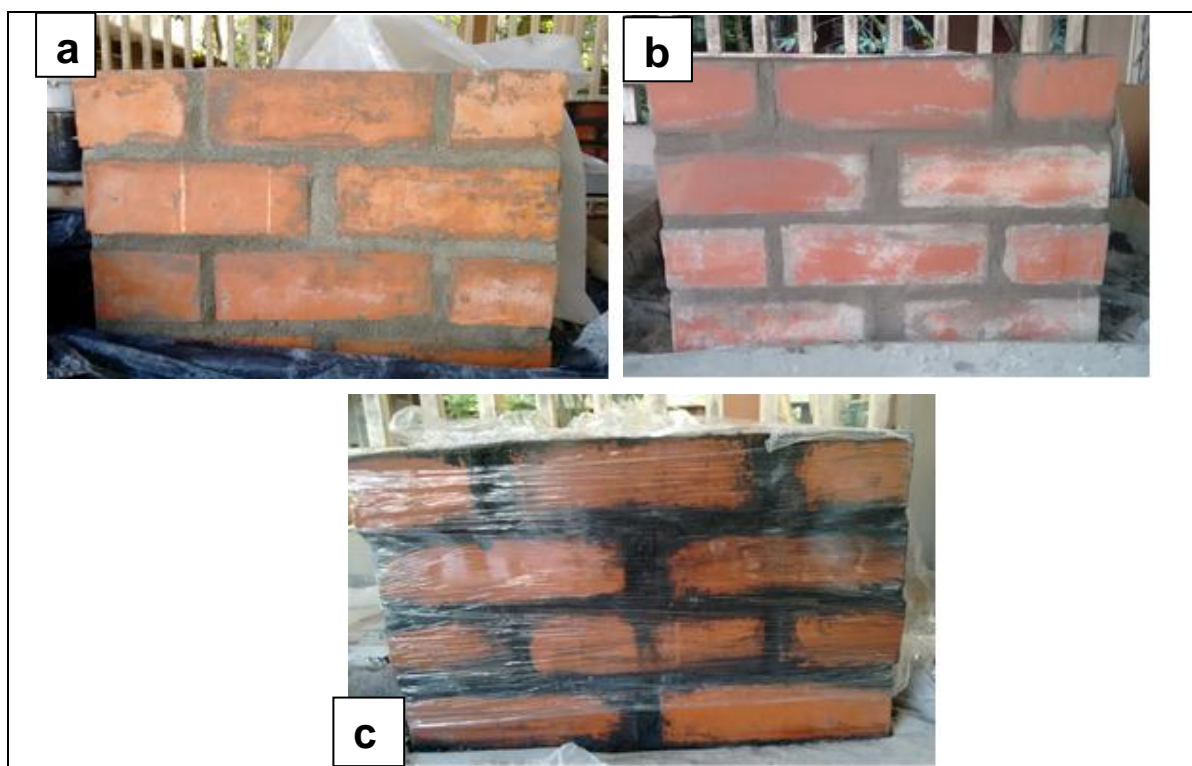
**Tabla 25.** Especificaciones Técnicas del ladrillo, Adaptada y tomada de la Ladrillera de Meléndez

|  |   |                                   |             |
|--|---|-----------------------------------|-------------|
|  | <b>Especificaciones Técnicas</b>                                    |                                   |             |
|  | <b>Ladrillo Estructura 12-29</b>                                    |                                   |             |
| <b>Dimensiones (cm)</b>  | <b>Largo</b>  | <b>Ancho</b>                      | <b>Alto</b> |
|  | 29  | 12                                | 10          |
| <b>Peso por unidad</b>   | 3.3 Kg  |                                   |             |
| <b>Aplicación del producto</b>   | Muros de fachada o a la vista<br>Muros divisorios<br>Muros de Carga |                                   |             |
| <b>Clasificación</b>   | Tipo PV   | Unidad de Mampostería Estructural |             |
| <b>Resistencia a la Compresión</b>   | 180.0 Kgf/cm2   |                                   |             |
| <b>Normas aplicadas</b>  | NTC 4205-1  |                                   | NSR-10      |

Después del curado inicial de 48 h, los muretes se conservaron, dentro de las películas, en un área donde no les daba la luz del sol, los muretes se removieron de la bolsa un día antes de su ensayo, ver figura 23.



El Mortero en su estado fresco debe ser capaz de soportar la masa de las unidades de mampostería cuando se colocan y facilitar su alineamiento. El mortero de CV-OPC, mostro mayor plasticidad al momento de colocar los ladrillos de mampostería, afectando su estabilidad. Provocando que el mortero comience a perderse por las juntas cuando se aplica presión para alinear la unidad de mampostería, esto se contrarrestó preparando mezclas en pequeñas cantidades logrando que con el tiempo fragüe y así incrementé su capacidad portante durante la construcción del murete, para empezar aplicar el mortero de relleno y la otra capa.



**Figura 23.** Muretes de Mampostería, a). Mortero de OPC2, b). Mortero de PN-GBFS, c). Mortero de CV-OPC.

Los muretes se ensayaron a los 28 días, en el laboratorio de estructuras de la escuela de ingeniería civil. Se realizó el montaje siguiendo la NTC 3495, tal como se visualiza en la figura 24, la carga se aplicó al murete, en este caso hasta que se visualizó fisuramiento del mismo, a una velocidad adecuada. El resto de la carga se aplicó, a una velocidad uniforme, durante un periodo no menos de 1 min y no más de 2 minutos. Y se obtuvieron los siguientes resultados, ver tabla 26.



**Figura 24.** Máquina de Ensayo de Resistencia a la compresión

**Tabla 26.** Resultados obtenidos del Ensayo a la compresión de Muretes.

| Murete con mortero de:     | Carga de Fisuramiento | Carga máxima | Resistencia a la compresión (fmt) |
|----------------------------|-----------------------|--------------|-----------------------------------|
|                            | (Kgf)                 | (Kgf)        | Mpa                               |
| OPC2                       | 12000                 | 36000        | 9.19                              |
| OPC2                       | 11000                 | 32000        | 8.71                              |
| <b>Promedio</b>            | <b>11500</b>          | <b>34000</b> | <b>8.68</b>                       |
| <b><math>\sigma</math></b> | <b>0,71</b>           | <b>2,82</b>  | <b>0.72</b>                       |
| PN-GBFS                    | 13000                 | 29200        | 7.46                              |
| PN-GBFS                    | 12000                 | 27000        | 6.90                              |
| <b>Promedio</b>            | <b>12500</b>          | <b>28100</b> | <b>7.18</b>                       |
| <b><math>\sigma</math></b> | <b>0,71</b>           | <b>1,55</b>  | <b>0.40</b>                       |
| CV-OPC                     | 4000                  | 6400         | 1.63                              |
| CV-OPC                     | 3800                  | 6000         | 1.53                              |
| <b>promedio</b>            | <b>3900</b>           | <b>6200</b>  | <b>1.58</b>                       |
| <b><math>\sigma</math></b> | <b>1,41</b>           | <b>2,82</b>  | <b>0.07</b>                       |

Para la determinación del área transversal, la norma NTC 3495 informa que para muretes inyectados se determina multiplicando la longitud por el espesor de los muretes, pudiéndose así determinar la resistencia del murete de mampostería

dividiendo la carga máxima a la compresión, soportada por el murete, por el área transversal neta correspondiente, ver tabla 26.

El muro de mampostería con mortero de PN-GBFS presenta mayor resistencia a la compresión siendo esta de 8,68 MPa a la edad de 28 días con respecto al muro con mortero de CV-OPC, que presento una resistencia a la compresión de 1,58 Mpa a la misma edad, presentando una falla de corte, ver figura 25.c, donde el agrietamiento de corte se presenta en forma de escalera por la junta del mortero siendo está caracterizada por su forma diagonal a lo largo del muro y es consecuencia de las tensiones de tracción diagonal o esfuerzos de corte que se produjeron en el mismo (Paez Moreno, Parra rojas, & Montaña Gutierrez, 2009).

Tal y como se ha ido presentando, el mortero de PN-GBFS presenta mejores propiedades como mortero siendo este caracterizado por propiedad y evaluado dentro de un sistema de constructivo, lo cual hace que este material sea el más similar al OPC.

La baja resistencia a la compresión del murete de CV-OPC se le atribuye a las bajas propiedades presentadas en la caracterización de este, baja resistencia a la compresión, alto porcentajes de poros y su poca trabajabilidad, que se comprueban a la hora de ser evaluados dentro del sistema constructivo en forma aplicativa.



**Figura 25.** Falla de los muretes de mampostería bajo carga a compresión. Murete con mortero de: a.) PN-GBFS, b.) CV-OPC y c.) OPC2



## CONCLUSIONES

- Las principales propiedades de los morteros de pega acorde a las especificaciones de la norma NSR-10 Cap. D son la fluidez y la resistencia a la compresión. Sin embargo, estas propiedades al ser evaluadas en los sistemas geopoliméricos vistas de forma independiente no permiten definir criterios para caracterizar el mortero de pega, por lo cual se hace necesario el considerar una sinergia entre estas para definir la aplicación y ajustarse a los criterios de la norma.
- A partir de la mezcla PN-GBFS, se obtuvo un mortero con un % fluidez de 70 y una resistencia a la compresión de 31,06 MPa a los 28 días, el cual puede clasificarse como un mortero tipo H.
- Por el contrario, a partir de CV aunque el mortero obtenido se puede catalogar como tipo M acorde al % de fluidez y la resistencia a la compresión, en la prueba práctica de aplicación no se observaron buenas características, por ello se recomienda continuar el estudio para mejorar este tipo de dificultades.
- La relación óptima cementante: arena para los sistemas geopoliméricos es 1:2.

## REFERENCIAS

- Davidovits J. (1991). Geopólymers inorganic polymeric new materials. *J. therm. Anal* 37, 1633-1656.
- A. Allahverdi, E. K. (2009). Construction wastes as raw materials for geopolymer binders. *Int. J. Civil Eng.*, 7 (3), 154–160.
- AIS (Asociación Colombiana de Ingeniería Sísmica) (2010), N. C.-1. (n.d.).
- Aitcin, P. (2000). Cementos de ayer y de hoy. Concreto de la mañana . *Cem horm Res* 30, pp. 1349-1359.
- Alonso, S., & Palomo, A. (2000). Alkaline Activation of metakaolin and calcium hydroxide mixtures: influence of Temperature, Activator Concentration and solids ratio. *Materials Letters*, 47, 55-62.
- Bakharev T. (2005). Geopolymeric materials prepared using class F fly ash and elevated temperature curing. *Cem. Concre. Res.*, 35, 1224-1232.
- Bernal, P. a. (2014). Geopolymers and related alkali-activated materials, *Annu. . Rev. Mater. Res.*, 44, 299–327.
- Berry M., C. D. (2009). Changing the Environment: An Alternative 'Green' Concrete Produced without Portland Cement. *Lexington, KY, USA*.
- C. Shi, P. K. (2006). cementos y hormigones alcalinos-activado, Taylor and Francis. *Londres y Nueva York (2006)*.
- Callejas, J. (1969). *Las Puzolanas*. Madrid , España: pp, 93.
- Chotetanorm, C. C. (2012). High Calcium Bottom Ash Geopolymer: Sorptivity, Pore Size and Resistance to Sodium. *Journal of Materials in Civil Engineering.*, 473.
- Crespo, E. Q. (2005). RELACIÓN ENTRE LAS PROPIEDADES GEOTÉCNICAS Y LOS COMPONENTES PUZOLÁNICOS DE LOS SEDIMENTOS PAMPEANOS. *Tesis Doctoral , Universidad de cordoba* , pp -68,69.
- Criado, M., Fernández, A., & Palomo, A. (2007). Alkali activation of the SiO<sub>2</sub>/Na<sub>2</sub>O ratio. Part I: FTIR study microporous and Mesoporous Materials,. 180-191.
- Curlandia, R. (2011). ,planeta concreto,Prometheus Books, Nueva York (2011). *Nueva York*.

- D. Flower, J. S. (2007). Green house gas emissions due to concrete manufacture. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 12 (5) , 282–288.
- D.L.Y. Kong, J. S.-C. (2007). Comparative performance of geopolymers made with metakaolin and fly ash after exposure to elevated temperatures. *Cem. Concr. Res.*, 37 (12) , 1583–1589.
- Davidovits, J. (2013). Geopolymer Cement. A review. Technical papers 21. *Geopolymer Institute.*, 1-11.
- Duxson, P. P. (2007). The role of inorganic polymer technology in the development of 'Green concrete',. *Cement and Concrete Research*, 2007a. vol. 37, 1590-1597.
- Escalante-García, J. (2015). Overview of potential of urban waste glass as a cementitious material in alternative chemically activated binders. *J. Chin. Ceram. Soc.*, 43.
- F. Pacheco-Torgal, D. M. (2011). Composition, strength and workability of alkali-activated metakaolin based mortars. *Constr. Build. Mater.*, 25 (9) .
- F. Puertas, M. T.-C. (2014). Use of glass waste as an activator in the preparation of alkali-activated slag. Mechanical strength and paste characterisation. *Cem. Concr. Res.*, 57 , 95–104.
- Fernández Jiménez A. y Palomo A. (2003). Characterization of fly ashes: Potential reactivity as alkaline cements. *Fuel* vol. 82, p. 2259-2265 .
- Fernández-Jiménez, P. A. (2003). Characterisation of fly ashes: Potential reactivity as alkaline cements. 2003, vol. 82, no. 18, pp. 2259-2265.
- G., K., & Fernández-Jiménez A, P. A. (2007). Alkali Activated fly ash. *Effect of thermal curing conditions on mechanical and microstructural development – part II. Fuel*. Vol. 86, 315-322.
- García Lodeiro I. et al. (2013). Hydration kinetics in hybrid binders: Early reaction stages. *Cement and Concrete Composites* , Vol 39, p. 82-92 .
- Habert, G. D. (2011). An environmental evaluation of geopolymer based concrete production: reviewing current. *Journal of Cleaner Production*.vol. 19, 1229-1238.
- Hogan, F. (1983). *Study of grinding energy required for pelletized and Water granulated*. Silic ind, Vol.48(3) pp 71-80.

- I, A. I. ((2009)). Uso de la cerámica de arcilla cocida triturada en la producción de morteros. *Dev sostener el Plan IV*, 120, 257-264.
- Ismail, I., Bernal, S.A., Provis, J.L., San Nicolas, R., Brice, D.G., Kilcullen, A.R., Hamdan, S. (n.d.).
- J. Kim, C. Y. (2015). Waste glass sludge as a partial cement replacement in mortar. *Build. Mater.*, 75, 242–246.
- J.J. Torres, M. P. (2009). Alkaline chemical activation of urban glass wastes to produce cementitious materials. *1st Spanish National Conference on Advances in Materials Recycling and Eco – Energy Madrid*, 12-13.
- J.S.J, Y. C. (2003). Microanalysis of calcium silicate hydrate gel formed within a geopolymeric binder. *Journal of materials Science* , Vol. 38., 3851-386. .
- Jara Mori, A. (2008). *Estudio de la aplicabilidad de materiales Compuestos al diseño de estructuras de Contención de tierras y su interacción con el Terreno, para su empleo*. Madrid , España: Universidad politécnica de Madrid. E.T.S de ingenieros de caminos, canales y puertos. Departamento de ingeniería y morfología del terreno, mayo de 2008.
- JGS., V. J. (2000). PhD thesis. *The University of Melbourne*.
- K. Komnitsas, D. Z. (2007). Geopolymerisation of low calcium ferronickel slags. *J. Mater. Sci*, 42 (9), 3073-3082.
- K.A. Melo, A. C. (2010). Effect of Metakaolin's finesses and content in self-consolidating concrete. *Constr. Build. Mater.*, 24 (8), 1529–1535.
- Khale D., Chaudhary R. (2007). Mechanism of geopolymerization and factors influencing its development. *Journal of Materials Sciencie* 42, 729-746.
- Komnitsas K., Zaharaki D. (2007). Geopolymerization: a review and prospects for the minerals industry. *Mineral Engineering*, 20, 1267-1277.
- Komnitsa, K. a. (2007). Dimitra. Geopolymerisation: A review and prospects for the minerals industry. *Minerals Engineering*, vol. 20, p. 1261–1277.
- Kong, D. &. (2010). Effect of elevated temperatures on geopolymer paste, mortar and concrete. . *Cement and Concrete Research*. 40 (2), 334–339.
- Kosmatka, S., & Kerkhoff B., P. W. (2004). *Diseño y Control de mezclas de Concreto*. Portland Cement Association.

- L. Reig, M. T. (2013). Properties and microstructure of alkali-activated red clay brick waste. *Build. Mater.*, 43, 98–106.
- M. Torres-Carrasco, F. P. (2015). Waste glass in the geopolymer preparation. Mechanical and microstructural characterisation. *J. Clean. Prod.*, 90, 397–408.
- M. Weil, K. D. (2009). Life-cycle analysis of geopolymers. *Industrial Applications, Woodhead Publishing Limited, Cambridge, England*, 194–210.
- Martín, M., & Orgilés, B. (1991). Adhesión y adhesivos de contacto. INESCOP y universidad de alicante.
- Merz, K. a. (1994). Immobilization of intermediate-level wastes in geopolymers. *J. Nucl. Mater.*, 211, pp. 141–148.
- Paez Moreno, D., Parra rojas, S., & Montaña Gutierrez, C. (2009). Alternativa estructural de refuerzo horizontal en muros de mamposteria. *Revista Ingenieria Universidad de Medellin*, 52-68.
- Palomo A., F. J. (2007). OPC-fly ash cementitious systems: study of gel binders produced during. *Journal of Materials Science vol. 42*, p. 2958-2966 .
- Palomo, A. K.-L.-J. (2014). A review on alkaline activation: new analytical perspectives. *Materiales de Construcción 64 (315)*, e022.
- Pan, Z. S. (2009). An investigation of the mechanisms for strength gain or loss of geopolymer mortar after exposure to elevated temperature. *Journal of Materials Science. 44 (7)*, 1873–1880.
- Paz, L. (1993). influencia d dos tipos de cenizas volanetes españolas en la microestructura del cemento portland hidraulico.
- Phair, J., Van Deventer, J., & Smith, J. (2000). Mechanism of polysialation in the incorporation of zirconia into fly ash-based geopolymer. In *industrial and Engineering Chemistry Research* (Vol. 39, pp. 2925-2934).
- Puertas, F. (1995). .Cementos de escoria activados alcalinamente. *Materiales de Construcción. Vol. 45 (239)*, 53-64.
- R. San Nicolas, M. C. (2013). Escadeillas.Characteristics and applications of flash metakaolins. *Clay Sci*, 253–262.
- Regourd M. (1986). Cements Replacement Materials. In: Concrete Technology and Design. london: Surrey University Press.

- Robayo, R. M. (2016). Natural pozzolan-and granulated blast furnace slag-based binary geopolymers. *Materiales de Construcción* 66 (321), e077.
- Robayo, R., & Mejía, R. (2016). Design and engineering properties of an environmentally. (T. comunicacion, Ed.) *Proceedings of the G Amazn y pacific green materials congress and sustainable construction materials lar-rilem conference*, 637.
- Rodriguez Martinez, E.D. (2009). *Eficiencia de activadores alcalinos basados en diferentes fuentes de sílice para la produccion de sistemas geopolimericos de ceniza volante*. Trabajo de investigación. Universidad politécnica de valencia.
- Ruiz-Santaquiteira, C. F.-J. (2013). Clay reactivity: Production of alkali activated cements. *Applied Clay Science* 73., 11-16.
- Runzhang, Y., Shi-Zi, O., & Qiong-Ying, G. (1983). *Structure and Hydraulic ACTivity of Slags in the Systemn CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>*. Sill. Ind. Vol.1 , 3-6.
- S. Ahmari, X. R. (2012). Production of geopolymeric binder from blended waste concrete powder and fly ash. *Build. Mater.*, 35, 718–729.
- S.J. van Deventer, J. P. (2007). Characterization of geopolymer cements and concretes: structure/property relations and commercial utilization. *12th International Congress on the Chemistry of Cement, Montreal*.
- Sathia, R., babu, K., & Santhanam, M. (2008). Estudio de Durabilidad del Hormigon bajo Nivel de Calcio de Cenizas Volantes. *Actas de la 3 conferencia de ACF\_ACF*.
- Shi, C., Krivenko, P., Della, R. (2006). *Alkali-Activated Cements and Concretes*. New york: Taylor & Francis.
- Sumajouw, M. &. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete: reinforced beams and columns. *Curtin University of Technology. Perth, Australia*.
- T. Stengel, J. R. (2009). Life cycle assessment of geopolymer concrete - what is the environmental benefit. *Concrete Solutions 09, Concrete Institute of Australia, Luna Park, Sydney, Australia*, 6a–4.
- Turner, L. &. (2013). Carbon dioxide equivalent (CO<sub>2</sub>-e) emissions: A comparison between geopolymer and OPC cement concrete. *Construction and Building Materials* 43., 125-130.

- U. Avila-López, J. A.-R.-G. (2015). Investigation of novel waste glass and limestone binders using statistical methods. *Constr. Build. Mater.*, 82 , 296–303.
- valbuena Porras, S., & Mena Serna, M. (2016, junio). Evaluacion de la Resistencia a la compresion en morteros de pega de acuerdo con la NSR-10. *Tecnura*, 20, 115-121.
- Wallah, S. &. (2006). Low-calcium fly ash-based geopolymer concrete. *long-term properties. Res. Report-GC2, Curtin University, Australia*, 76-80.
- Wastiels, J. X. (1993). Mineral polymer based on fly ash. *9th International Conference on Solid Waste Management, Widener University, Philadelphia, USA Nov*, 14-17.
- Xu, H., & J, V. D. (2000). Ab initio calculations on the fivemembereddealuminio-silicate Framework rings model: implications for dissolution in alkaline solutions. In *Computer and chemistry* (Vol. 24, pp. 391-404).
- Xu, H; Van deventer, J. (2000). *The geopolymerisation of alumino-silicate minerals en:International Journal of mineral processing* (Vol. 59). Elsevier.
- Yip C.K, L. G. (2008). Effect of calcium silicate sources on geopolymerisation. *Cement and Concrete Research*, v 38, n 4, 554-564 .
- Z. Sun, H. C. (2013). Synthesis and thermal behavior of geopolymer-type material from waste ceramic *Constr. Build. Mater.*, 49, 281–287.